

ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)  
12+

# **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ**

**Tom 49 № 1 2026**  
Vol.

# **EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE**

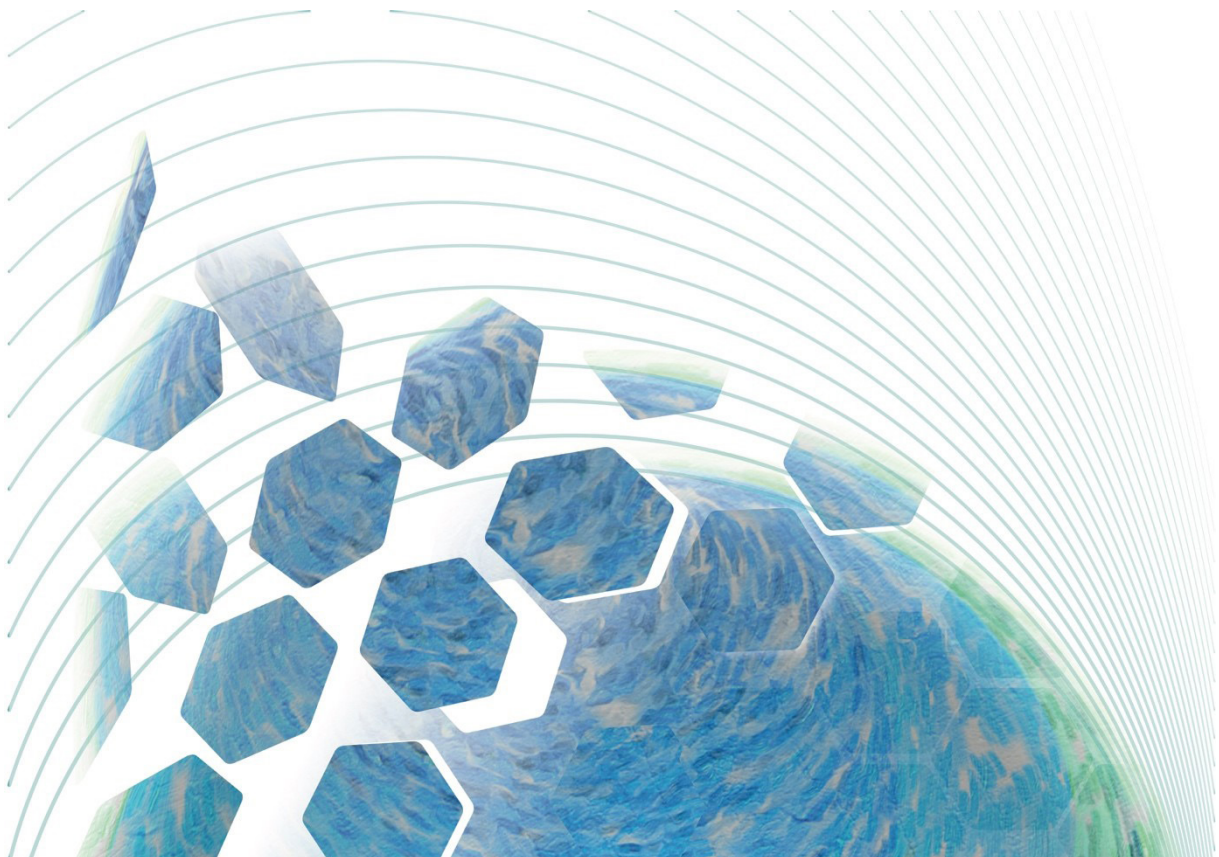
ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 49 № 1 2026  
Vol. 49 No 1 2026

## EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE  
I NEDROPOL'ZOVANIE



## Редакционный совет

**Гладкочуб Д.П.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

**Скляр Е.В.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

**Гордиенко И.В.**, член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

**Корняков М.В.**, д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Корольков А.Т.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)

**Макаров В.А.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

**Очир Гэрэл**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (Улан-Батор, Монголия)

**Тальгамер Б.Л.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Ши Гуаньхай**, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (Пекин, Китай)

**Чжао Цзюньмэн**, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (Пекин, Китай)

**Чжан Юнчжань**, доктор наук, проф., Нанкинский университет (Нанкин, Китай)

**Шигин А.О.**, д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

**Семинский К.Ж.**, д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

**Тимофеева С.С.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Зелинская Е.В.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Морин А.С.**, д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

### *Председатель редакционного совета:*

**Семинский Ж.В.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

## Редакционная коллегия

### *Главный редактор:*

**Паршин А.В.**, канд. геол.-минерал. наук, профессор практики, научный руководитель института «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

### *Заместитель главного редактора:*

**Аузина Л.И.**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

### *Ответственный секретарь:*

**Долгих М.Н.**, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» входит в международные базы данных GeoRef и Chemical Abstracts Service (CAS), отнесен к уровню 2 «Белого списка» Единого государственного перечня научных изданий (ЕГПНИ), включен в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВИННИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

**Периодичность выхода** – ежеквартально

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
Регистрационный номер:  
ПИ № ФС77-76110 от 24 июня 2019 г.

### **Учредитель и издатель:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

### **Издательство:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

### **Адрес редакции:**

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
e-mail: nzn@istu.edu

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 2026

## Editorial Council

**Gladkochub D.P.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

**Sklyarov E.V.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

**Gordienko I.V.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)

**Kornyakov M.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Korolkov A.T.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)

**Makarov V.A.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**Ochir Gerel**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)

**Talgamer B.L.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Shi Guanghai**, Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)

**Zhao Junmeng**, Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)

**Zhang Yongzhan**, Ph.D., Professor, Nanjing University (Nanjing, China)

**Shigin A.O.**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**Seminsky K.Zh.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

**Timofeeva S.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Zelinskaya E.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Morin A.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

### *Chairman of the Editorial Council*

**Seminsky Zh.V.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

## Editorial Board

### *Editor-in-Chief*

**Parshin A.V.**, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Scientific Director of the Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

### *Deputy Editor-in-Chief*

**Auzina L.I.**, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

### *Executive secretary*

**Dolgikh M.N.**, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal «Earth sciences and subsoil use» is included in the **GeoRef and Chemical Abstracts Service databases, in the Unified State List of Scientific Publications – the «White List» (Level 2) and current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses of the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation.** It is also included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the Ural-Press LLC, the subscription code in Ural-Press LLC: 41538 (the postal address of Ural-Press LLC: 130 Mamin-Sibiriyak St., Yekaterinburg 620026, Russia). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Interuniversity collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

### Publication frequency

A quarterly journal

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)  
Registration No.:  
ПИ no. ФС77-76110 of June 24, 2019

### Founder and Publisher

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University" 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

### Publishing House

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University" 83A Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

### Editorial Office

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
e-mail: nzn@istu.edu

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 2026



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Содержание</b> .....	4
<b>Белькович М.Л.</b> Сравнительная оценка фильтрационно-емкостных свойств разнотипных коллекторов по экспресс-исследованиям керна (на примере Тас-Юряхского месторождения).....	6
<b>Перельгин И.В., Болотнев А.Ю.</b> Исследование физико-механических свойств и методы повышения прочности бетонной шахтной крепи при влиянии агрессивных факторов внешней среды .....	18
<b>Черемисин И.О., Стукова Е.В.</b> Современные геохимические методы локального прогноза нефтегазоносности в арктических регионах Западной и Восточной Сибири: сравнительный анализ.....	30
<b>Ярощук И.А., Панфилов В.Ю., Пушмин П.С., Подоляко Д.С.</b> Многосторонняя стимуляция пласта как альтернатива гидравлическому разрыву для карбонатных коллекторов с тонкими нефтяными оторочками .....	46
<b>Сукнева М.О., Радомская Т.А., Гавриленко В.В., Чуешова А.Г.</b> Ниобиевое оруденение Большетагнинского месторождения (Восточный Саян) .....	55
<b>Пыжьянов Д.И., Сарапулова Г.И.</b> Пространственно-временное распределение элементов в техногенных почвах Ковыктинского газоконденсатного месторождения .....	72
<b>Собенников В.О., Гура Э.Н., Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г., Буглов А.Н., Гладышев Д.Д.</b> Повышение эффективности цементирования скважин в сложных горно-геологических условиях за счет применения подпревенторного герметизатора .....	84
<b>Гантимурова С.А., Паршин А.В., Хуан Г., Ли Ц., Цзин Ц., Залуцкий В.Т.</b> Сравнительная оценка информативности спутниковых данных и данных с беспилотных летательных аппаратов при решении задач картирования оползневой опасности .....	96
<b>К сведению авторов</b> .....	111



## C O N T E N T S

<b>Contents</b> .....	5
<b>Belkovich M.L.</b> Comparative assessment of porosity and permeability properties of different reservoir types using express core analysis: a case study of the Tas-Yuryakh field (In Russ.).....	6
<b>Perelygin I.V., Bolotnev A.Yu.</b> Study of physico-mechanical properties and methods for increasing the strength of concrete shaft supports under the influence of aggressive environmental factors (In Russ.).....	18
<b>Cheremisin I.O., Stukova E.V.</b> Modern geochemical methods for local oil and gas potential prediction in the Arctic regions of Western and Eastern Siberia: a comparative analysis (In Russ.) .....	30
<b>Yaroshchuk I.A., Panfilov V.Yu., Pushmin P.S., Podoliako D.S.</b> Multilateral stimulation technology as an alternative to hydraulic fracturing for carbonate reservoirs with thin oil rims (In Russ.).....	46
<b>Sukneva M.O., Radomskaia T.A., Gavrilenko V.V., Chueshova A.G.</b> Niobium mineralization of the Bolshetagninskoye deposit (Eastern Sayan) (In Russ.) .....	55
<b>Pyzhianov D.I., Sarapulova G.I.</b> Spatiotemporal distribution of elements in technogenic soils of Kovykta gas condensate field (In Russ.) .....	72
<b>Sobennikov V.O., Gura E.N., Sverkunov S.A., Vakhromeev A.G., Buglov A.N., Gladyshev D.D.</b> Improving well cementing efficiency in complex mining and geological conditions through the use of a sub-preventer sealer (In Russ.).....	84
<b>Gantimurova S.A., Parshin A.V., Huang G., Li J., Jing C., Zalutskii V.T.</b> Comparative assessment of satellite and unmanned aerial vehicles data for landslide susceptibility mapping (In Russ.) .....	96
<b>Information for the Authors</b> .....	111



Научная статья

УДК 550.8.023

EDN: IYXIS

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-1



## Сравнительная оценка фильтрационно-емкостных свойств разнотипных коллекторов по экспресс-исследованиям керна (на примере Тас-Юряхского месторождения)

М.Л. Белькович<sup>a✉</sup><sup>a</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

**Резюме.** Цель статьи – представить результаты комплексных экспресс-петрофизических исследований керна, выполненных на одной из скважин Тас-Юряхского нефтегазоконденсатного месторождения. Исследования охватывают три продуктивных горизонта:  $C_1b^{lo-ll}$  (Осинский),  $Vbk_1^{bt}$  (Ботубинский) и  $Vcr^{tl}$  (Талахский). В ходе работы получен и проанализирован массив данных, включающий определения открытой пористости, абсолютной проницаемости, остаточной водонасыщенности и углеводородонасыщенности, карбонатности. В результате установлены принципиальные различия в фильтрационно-емкостных свойствах изученных горизонтов, обусловленные их литологией и типом пустотного пространства. Ботубинский горизонт охарактеризован как высококачественный терригенный коллектор с рекордными значениями проницаемости до 837,1 мД и пористости до 27,5 %. Для Осинского горизонта, сложенного карбонатными породами, выявлен диагностический парадокс между крайне низкой проницаемостью матрицы (0,42 мД) и явными признаками углеводородного насыщения, что указывает на трещинный тип коллектора. Талахский горизонт, несмотря на признаки остаточной битуминизации, обладает изолированным поровым пространством и низкими фильтрационно-емкостными свойствами (проницаемость около 3,5 мД), что исключает его промышленную ценность на исследованном участке. Особое внимание в работе уделено детальному анализу взаимосвязи пористости и проницаемости, что стало ключевым инструментом для дифференциации коллекторов по генетическому типу пустотного пространства и оценки их потенциала. Полученные результаты имеют важное практическое значение для построения достоверной геологической модели месторождения и планирования эффективной системы разработки.

**Ключевые слова:** керн, фильтрационно-емкостные свойства, петрофизические характеристики, терригенные коллекторы, карбонатные коллекторы, экспресс-исследования керна

**Для цитирования:** Белькович М.Л. Сравнительная оценка фильтрационно-емкостных свойств разнотипных коллекторов по экспресс-исследованиям керна (на примере Тас-Юряхского месторождения) // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 6–17. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-1>. EDN: IYXIS.

Original article

## Comparative assessment of porosity and permeability properties of different reservoir types using express core analysis: a case study of the Tas-Yuryakh field

Mikhail L. Belkovich<sup>a✉</sup><sup>a</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of the article is to present the results of comprehensive express petrophysical core studies conducted at one of the wells of the Tas-Yuryakh oil and gas condensate field. The research covers three productive horizons:  $C_1b^{lo-ll}$  (Osinsky),  $Vbk_1^{bt}$  (Botuobinsky), and  $Vcr^{tl}$  (Talakhsy). The study obtains and analyzes a dataset including the measurements of effective porosity, absolute permeability, residual water and hydrocarbon saturation and carbonate content. As a result, fundamental differences in the reservoir properties of the studied horizons have been established, determined by their lithology and type of void space. The Botuobinsky horizon is characterized as a high-quality terrigenous reservoir with record permeability values of up to 837.1 mD and porosity of up to 27.5%. For the Osinsky horizon composed of carbonate rocks a diagnostic paradox has been revealed between the extremely low matrix permeability (0.42 mD) and clear signs of hydrocarbon saturation that indicates a fractured reservoir type. The Talakhsy horizon, despite the signs of residual bituminization, features isolated void space and low reservoir properties (permeability is around 3.5 mD), which excludes its commercial value in the studied area. The study focuses on the detailed analysis of the porosity-permeability relationship, which becomes a key tool for differentiating reservoirs by the genetic type of void space and their potential

© Белькович М.Л., 2026



assessment. The research results are of significant practical importance for building a reliable geological model of the field and designing an effective development system.

**Keywords:** core, porosity and permeability (reservoir) properties, petrophysical characteristics, terrigenous reservoirs, carbonate reservoirs, express core analysis

**For citation:** Belkovich M.L. Comparative assessment of porosity and permeability properties of different reservoir types using express core analysis: a case study of the Tas-Yuryakh field. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):6-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-1>. EDN: IYXIS.

## Введение

Эффективная и достоверная оценка фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов является одной из ключевых задач на всех стадиях геолого-разведочных работ и разработки месторождений углеводородов. От точности определения таких параметров, как пористость, проницаемость и характер насыщения, напрямую зависят подсчет запасов, построение адекватных геологических и гидродинамических моделей, а также планирование и оптимизация<sup>1</sup> системы разработки<sup>2</sup> [1, 2]. Особую сложность представляют собой разрезы, состоящие из разнотипных коллекторов – терригенных и карбонатных, которые могут кардинально различаться по строению пустотного пространства и, как следствие, по условиям фильтрации флюидов [3, 4].

В этом контексте особую ценность приобретают экспресс-петрофизические исследования керн (ЭИК), выполняемые непосредственно на скважине<sup>3</sup> в процессе бурения<sup>4</sup> [5, 6]. Они позволяют в кратчайшие сроки получить первичный массив высококачественных данных о свойствах пород, минуя длительные стадии подготовки и транспортировки образцов в стационарные лаборатории [7]. Данные ЭИК служат основой для оперативного принятия технологических решений, корректировки проектного разреза, а также являются фундаментом для последующей интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС). Без надежной петрофизической привязки, которую предоставляет керн, данные ГИС могут быть неверно истолкованы, что ведет к риску недооценки или переоценки продуктивного потенциала пластов.

Тас-Юряхское нефтегазоконденсатное месторождение характеризуется сложным геологическим строением с наличием нескольких продуктивных горизонтов, относящихся к разным литолого-стратиграфическим комплексам. Вскрытый интервал включает три таких горизонта: Осинский ( $E_1bl^{o-II}$ ), Ботуобинский ( $Vbk_1^{bt}$ ) и Талахский ( $Vcr^{tl}$ ). Их коллекторы потенциально относятся к различным типам: карбонатные породы Осинского горизонта могут быть трещинными, терригенные песчаники Ботуобинского – поровыми с высокой продуктивностью (рис. 1), а породы Талахского горизонта, по предварительным данным, могут демонстрировать низкие ФЕС [8, 9]. Такое разнообразие требует детального дифференцированного изучения.

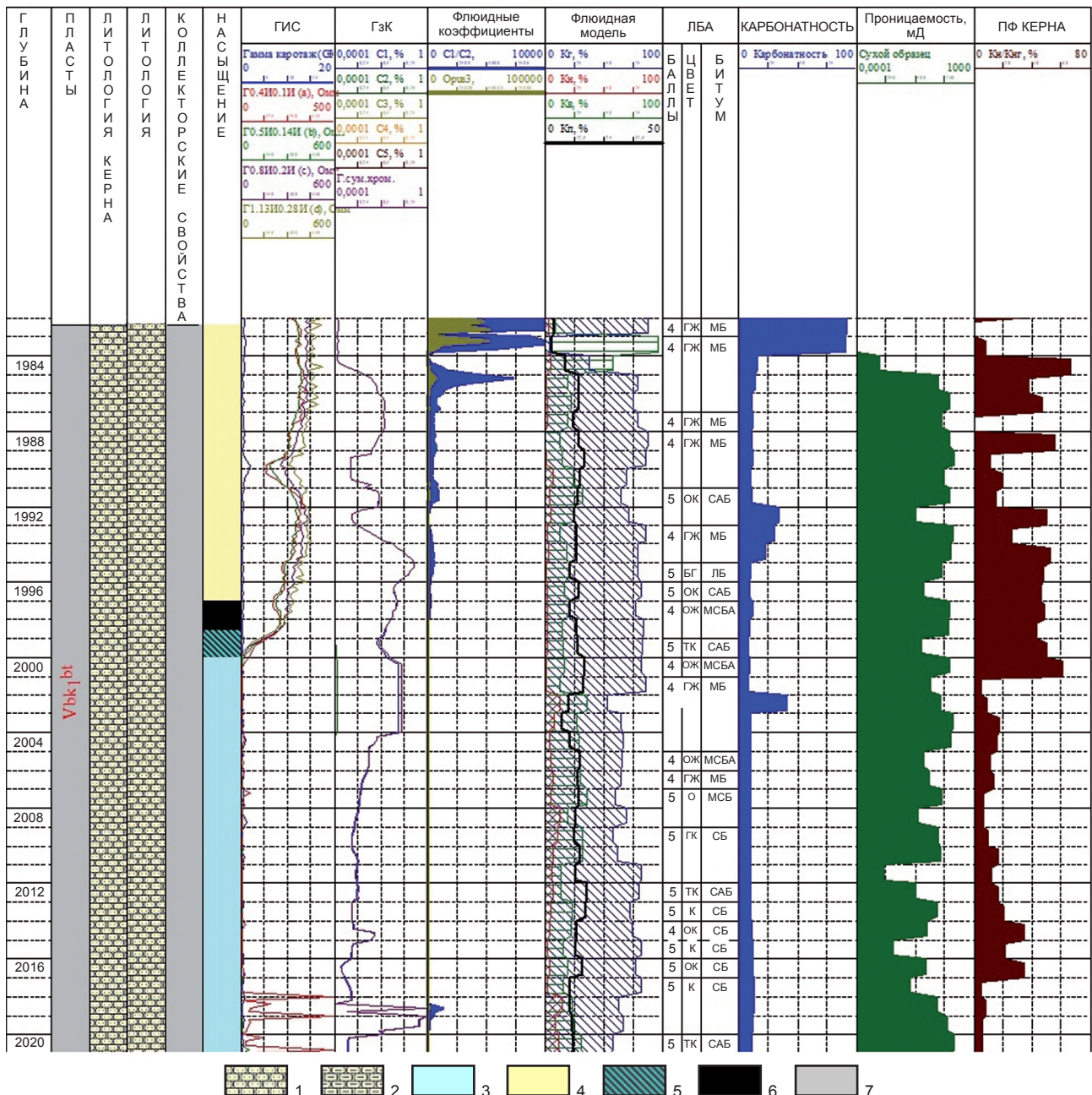
Целью настоящей работы является комплексный анализ ФЕС коллекторов горизонтов  $E_1bl^{o-II}$ ,  $Vbk_1^{bt}$  и  $Vcr^{tl}$  Тас-Юряхского нефтегазоконденсатного месторождения по данным комплекса экспресс-петрофизических исследований керн. Для достижения этой цели в работе решались следующие задачи: определение открытой пористости, абсолютной проницаемости, остаточной водонасыщенности и углеводородонасыщенности, карбонатности и поверхностных свойств пород; установление корреляционных зависимостей между основными петрофизическими параметрами; дифференциация коллекторов по типу пустотного пространства на основе анализа связи «пористость–проницаемость» и интеграция полученных результатов с данными ГИС и опробования для комплексной оценки продуктивного потенциала каждого горизонта.

<sup>1</sup> Авчян Г.М., Баюк Е.И., Вейнберг А.К., Дортман Н.Б., Зотова И.Ф., Иванов В.Н. [и др.]. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): справочник геофизика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 455 с.

<sup>2</sup> Некрасов А.С. Физика горных пород: учеб. пособ. Пермь: ПГНИУ, 2025. 190 с.

<sup>3</sup> Бурлин Ю.К., Иванов М.К., Калмыков Г.А., Карнюшина Е.Е., Коробова Н.И. Петрофизические методы исследования керна (терригенные отложения): учеб. пособ. Кн. 1. М.: Моск. ун-т, 2008. 112 с.

<sup>4</sup> Белохин В.С., Иванов М.К., Калмыков Г.А., Корост Д.В., Хамидуллин Р.А. Петрофизические методы исследования керна (карбонатные отложения): учеб. пособ. Кн. 2. Лабораторные методы петрофизических исследований керна. М.: Моск. ун-т, 2008. 113 с.



**Рис. 1. Комплексная диаграмма экспресс-петрофизических исследований ядра для Ботуобинского горизонта:**

1 – песчаники; 2 – песчаники глинистые; 3 – вода; 4 – газ; 5 – вода + нефть; 6 – нефть; 7 – коллектор  
**Fig. 1. Complex diagram of express petrophysical core studies for the Botuobinsky horizon:**  
 1 – sandstones; 2 – clay sandstones; 3 – water; 4 – gas; 5 – water + oil; 6 – oil; 7 – reservoir

**Материалы и методы исследования**

Оценка ФЕС горных пород составляет фундаментальную основу прогнозирования продуктивности и подсчета запасов углеводородных месторождений<sup>5</sup> [10]. Теоретической базой для таких исследований служит петрофизика, устанавливающая количествен-

ные связи между физическими параметрами пород и их способностью аккумулировать и фильтровать флюиды.

Ключевыми параметрами, определяющими потенциал коллектора, являются открытая пористость  $K_p$ , характеризующая объем пустотного пространства, способного содержать флюиды, и абсолютная проницаемость  $K_{пр}$ ,

<sup>5</sup> Аметов И.М., Ковалев А.Г., Мирзаджанзаде А.Х. Физика нефтяного и газового пласта: учебник. М.: Недра, 1992. 269 с.



отражающая способность породы пропускать через себя флюиды при перепаде давления. Эти параметры не являются независимыми; их взаимосвязь, описываемая корреляционными зависимостями, служит важнейшим диагностическим признаком типа коллектора<sup>6</sup> [11].

Для поровых терригенных коллекторов характерна устойчивая прямая корреляция между пористостью и проницаемостью, обусловленная хорошей сообщаемостью поровых каналов. В случае трещинных или каверновых коллекторов, представленных карбонатными породами, эта связь ослабевает или становится неочевидной, так как фильтрация осуществляется преимущественно по системе трещин, в то время как пористость матрицы может оставаться низкой [12]. Еще одним критически важным аспектом является характер насыщения породы, определяемый остаточной водонасыщенностью  $K_g$  и углеводородонасыщенностью  $K_{не}$ . Анализ этих параметров позволяет дифференцировать промышленно насыщенные коллекторы от зон с остаточной углеводородной насыщенностью, не имеющей промыслового значения [13].

Интерпретация данных о ФЕС в значительной степени зависит от литологии пород, которая предопределяет как исходные характеристики коллектора, так и направленность постседиментационных преобразований. Терригенные коллекторы, типичным представителем которых являются песчаники, обычно формируются в условиях относительно стабильных седиментационных процессов, что обеспечивает их высокую седиментационную однородность. Их ФЕС прежде всего определяются первичными характеристиками: гранулометрическим составом, сортировкой зерен, характером упаковки и составом аутигенного цемента. Благодаря этому они демонстрируют более предсказуемые и статистически устойчивые корреляционные связи между основными параметрами, такими как пористость и проницаемость, а их пустотное пространство представлено в основном межзерновой пористостью с относительно хорошей сообщаемостью каналов. В отличие от них, карбонатные коллекторы (известняки, доломиты) отличаются принципиально иной, зачастую крайней неоднородностью, которая закладывается еще на стадии осад-

конакопления (биогенная природа, рифовые постройки) и кардинально усложняется в ходе диагенеза и катагенеза [3, 14, 15]. Ключевую роль в формировании их окончательного облика играют сложные постседиментационные процессы – перекристаллизация, а также интенсивное трещинообразование под тектоническим воздействием, кавернообразование в результате выщелачивания и вторичная доломитизация. Эти процессы не просто модифицируют, а зачастую полностью перераспределяют пустотное пространство, создавая сложные двойные системы: низкопроницаемую матрицу, сочетающуюся с высокопроницаемыми трещинами и кавернами. Такая сложная архитектура приводит к существенной анизотропии свойств, нелинейным зависимостям между объемом пустот и фильтрационной способностью, а также к значительным локальным колебаниям параметров в пределах одного горизонта. Следовательно, корректная оценка потенциала и построение прогнозных моделей для карбонатных коллекторов требуют не только стандартного анализа керна, но и обязательного учета данных о трещиноватости, результатов специализированных исследований (например, капиллярного давления) и применения комплексных методов геофизической интерпретации, позволяющих выделять влияние разных типов пустот [16–20].

Таким образом, теоретической основой для достоверной оценки коллекторов является не изолированное рассмотрение отдельных параметров, а комплексный анализ всей совокупности данных – пористости, проницаемости, насыщенности, литологии и их взаимосвязей, что позволяет корректно классифицировать тип коллектора, выявить его пространственную зональность и построить репрезентативную петрофизическую модель, являющуюся основой для всех последующих технологических и экономических расчетов.

Всего в исследовании было задействовано 8 кернов, что в сумме составило 153 измерения пористости и плотности и 125 определений по другим ключевым параметрам.

Ниже приведены петрофизические параметры, определяемые при ЭИК непосредственно на скважине, и основные цели их получения (табл. 1).

<sup>6</sup> Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канайкин В.С., Номоконова Г.Г. Петрофизика: учебник. Томск: Томский ун-т, 1997. 462 с.

**Таблица 1. Набор петрофизических параметров, определяемых при экспресс-исследованиях керна**  
**Table 1. Set of petrophysical parameters determined by express core studies**

Измеренный параметр	Аппаратура, методика определения	Погрешность измерений	Применение параметра
$K_n$	Весовой метод (жидкостенасыщения)	$\pm 0,5 \%$	Выявление коллекторов; настройка расчетов по геофизическим исследованиям скважин; расчет $K_e$ и $K_{не}$ ; литолого-фациальная характеристика пород
$K_{np}$	Зондовый пермеаметр	$\pm 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^2$	Оценка проницаемости пород
$\bar{\sigma}_{об}$	Весы, весовой метод	$\pm 0,05 \text{ г/см}^3$	Промежуточный параметр при расчете $K_n$
$K_e$	АДЖ, дистилляция жидкости (расчетный)	$\pm 0,5 \%$	Определение содержания жидких углеводородов; определение характера насыщения
$K_{не}$	АДЖ, дистилляция жидкости (расчетный)	$\pm 0,5 \%$	
Карбонатность	Карбонатометр	$\pm 0,2 \%$	Определение типа цемента
Смачиваемость	Визуально, по растеканию капли	–	–
Люминесцентность Люминесцентно- битуминологический анализ	В породе  В порошке	–	Наличие остаточных углеводородов как прямого признака насыщения

Коэффициент открытой пористости  $K_n$  определялся весовым методом с погрешностью  $\pm 0,5 \%$  и применялся для выявления коллекторов, настройки интерпретации ГИС и расчета насыщенности. Абсолютная проницаемость  $K_{np}$  измерялась зондовым пермеаметром и служила прямой оценкой фильтрационной способности пород. Остаточная водонасыщенность  $K_e$  и нефтегазонасыщенность  $K_{не}$  устанавливались методом дистилляции на аппарате АДЖ-2 и были критически важны для определения характера насыщения. Дополнительно определялись карбонатность для оценки типа цемента, смачиваемость визуальным методом для целей интерпретации удельного электрического сопротивления, а также люминесцентно-битуминологические характеристики как прямой признак наличия остаточных углеводородов.

Процедурно работа включала отбор и подготовку образцов с их последующим кондиционированием, после чего для каждого образца выполнялся цикл измерений перечисленных параметров. Полученные данные систематизировались в сводные таблицы и визуализировались в виде кросс-плотов для анализа взаимосвязей, ключевым из которых являлось соотношение «пористость – проницаемость», позволившее дифференцировать типы коллекторов. Важным аспектом методологии стала интеграция результатов ЭИК с данными ГИС и опробования на кабеле, что обеспечило комплексность и повышенную достоверность

итоговой интерпретации. Результаты исследования образцов керна указаны в табл. 2 (приведены средние значения параметров).

### Результаты исследования и их обсуждение

*Общая характеристика вскрытого интервала.* Пористость песчаников вскрытого интервала ( $Vb_{k_1}^{bt}$ ;  $Vcr^{tl}$ ), за исключением его карбонатных разностей, варьируется от 6,1 до 27,5 %, при этом проницаемость изменяется в диапазоне 4,98–833,26 мД ( $10^{-3} \text{ мкм}^2$ ). Соотношение коэффициентов пористости и проницаемости приведено на рис. 2.

По соотношению пористости и проницаемости выделяем две зоны: зона с хаотическим облаком распределения и зона с прямой зависимостью  $K_{np}$ - $K_n$ . Прямая зависимость  $K_{np}$ - $K_n$  свидетельствует о наличии сообщения между порами и является признаком коллектора. Отсутствие зависимости  $K_{np}$ - $K_n$  свидетельствует об обратном. Условная граница –  $K_{np}$ , при превышении которого песчаник в данном интервале является коллектором 450 мД ( $10^{-3} \text{ мкм}^2$ ). Соответственно, для определения характера насыщения следует анализировать образцы песчаника с  $K_{np} > 450 \text{ мД}$  ( $10^{-3} \text{ мкм}^2$ ).

Отсутствие точек по Осинскому горизонту на рис. 1 не является методической ошибкой, а отражает принципиально иной тип его коллекторских свойств. В отличие от Ботубинского и Талахского горизонтов, для которых фильтрационно-емкостные параметры в первом при-



**Таблица 2. Измеренные параметры для отобранных образцов керна**  
**Table 2. Measured parameters for selected core samples**

Измеренный параметр	Номер керна (с указанием горизонта)							
	1 (Осинский)	2 (Осинский)	3 (Ботуобинский)	4 (Ботуобинский)	5 (Ботуобинский)	6 (Ботуобинский)	7 (Талахский)	8 (Талахский)
Интервал, м	1533–1555	1555–1560	1968–1991	1991–2013	1981–2004	2004 – 2022	2022–2033	2076–2105
Тип пород	Доломит	Доломит	Песчаник	Песчаник	Песчаник	Песчаник	Аргиллит	Аргиллит
$K_n$ , %	3,69	2,06	13,15	15,71	11,73	13,59	17,10	4,87
$\delta_{об}$ , г/см <sup>3</sup>	2,77	2,89	2,73	2,72	2,73	2,74	2,83	2,62
$K_{np}$ , мД	0,47	0,24	343,89	625,24	624,86	622,41	2,6	4,9
$K_g$ , %	46,98	59,75	26,23	25,50	24,39	24,56	19,62	35,70
$K_{не}$ , %	53,02	40,25	73,77	74,50	75,61	75,44	90,38	64,30
Карбонатность, %	92,75	81,96	55,32	9,53	24,81	89,19	11,36	13,48
Смачиваемость	Гидрофобный	Гидрофобный	Гидрофильный	Гидрофильный	Гидрофильный	Гидрофильный	Смешанный	Смешанный



**Рис. 2. Соотношение коэффициентов открытой пористости и абсолютной проницаемости  $K_n/K_{np}$  песчаников пластов  $Vbk_1^{bt}-Vcr^{dl}$ :**

1 – все замеры; 2 – условная граница коэффициента абсолютной проницаемости

**Fig. 2. Effective porosity  $K_n$  / absolute permeability  $K_{np}$  ratio of sandstones in  $Vbk_1^{bt}-Vcr^{dl}$  formations:**  
1 – all measurements; 2 – conditional limit of the absolute permeability coefficient

ближении могут быть охарактеризованы матричными величинами пористости и проницаемости и, соответственно, представлены в виде зависимости  $K_n-K_{np}$ . Осинский горизонт функционирует как преимущественно трещиноватый коллектор, где основную роль в фильтрации и емкости играет сеть открытых трещин, а не по-

ровое пространство матрицы. В таких условиях матричные значения  $K_n$  и  $K_{np}$  по керну оказываются слабо репрезентативными для реальной фильтрации и не образуют устойчивого тренда на диаграмме  $K_n/K_{np}$ , поэтому включение их в общий график вводило бы читателя в заблуждение: визуально создавалось бы впечатле-



ние «низкокачественного коллектора», тогда как высокая продуктивность связана именно с трещинной системой, учитываемой уже на этапах интерпретации данных гидродинамического каротажа и опробования пластов.

*Петрофизическая характеристика пласта  $E_1bl^{o-I}$  (Осинский горизонт).* В интервале отбора керна 1533–1560 м Осинский горизонт сложен карбонатными породами, демонстрирующими вертикальную литологическую неоднородность. В интервале 1533–1542 м породы представлены доломитами известковистыми, коричнево-серыми, тонкокристаллическими, с массивной и параллельно-слоистой текстурой. Для них характерны высокая плотность и прочность, а также неровный раковистый излом. Наблюдается субгоризонтальная слоистость, вдоль плоскостей которой фиксируются корочки битумов темно-бурого цвета. В интервале 1543–1549 м распространены известняки глинистые, серые с коричневатым оттенком, тонкокристаллические, также с массивной и слоистой текстурой. В данном интервале документируется наличие единичной слабонаклонной трещины ( $10-15^\circ$  к оси керна) закрытого типа мощностью до 0,5 мм, по которой также развиты битуминозные пленки. Интервал 1550–1560 м сложен доломитами известковистыми глинистыми, серыми, от тонко- до мелкокристаллических, с массивной текстурой.

Коллектор относится к трещинному типу. Нефтегазопроявления зафиксированы на глубинах 1539, 1545–1547 и 1556–1557 м. Люминесцентно-битуминологический анализ показал интенсивное свечение: 3 балла – по бурому газовому люминесценту, 3 балла – по бурому жирному, 4 балла – по оранжево-желтому массивному свечению битуминозных ассоциаций.

При вскрытии пласта зарегистрирован рост суммарных газопоказаний от 0,0001 до 0,0403 %. Газовый состав характеризуется преобладанием метана (92,94 %) с содержанием гомологов:  $C_2$  – 4,79 %,  $C_3$  – 0,93 %,  $C_4$  – 0,74 %,  $C_5$  – 0,60 %.

По данным лабораторных исследований керна доломиты и известняки горизонта имеют низкие ФЕС: открытая пористость составляет 1,5–5,8 % (среднее 3,4 %), проницаемость – 0,18–0,96 мД (среднее – 0,42 мД). Анализ остаточной насыщенности выявил широкий разброс значений: водонасыщенность – 7,7–75,1 % (среднее – 50,3 %), нефтенасыщенность – 0–25,9 % (среднее – 5,8 %), газонасыщенность – 11,8–91,1 % (среднее –

43,9 %). Установлена гидрофобная природа поверхности пород.

Интерпретация данных ГИС указывает на продуктивный характер пласта: удельное электрическое сопротивление варьирует от 8,69 до 53,95 Ом\*м (среднее – 28,66 Ом\*м), расчетная пористость – 11–12 %, нефтегазонасыщенность – 84–93 %. Результаты опробования на кабеле на глубине 1545 м подтвердили газовый приток.

Таким образом, комплексные данные петрофизических исследований керна, геофизических исследований скважин и результатов опробования однозначно свидетельствуют о продуктивности пласта  $E_1bl^{o-II}$  с газовым характером насыщения.

*Петрофизическая характеристика пласта  $Vbk_1^{bt}$  (Ботубобинский горизонт).* Литологическое строение Ботубобинского горизонта характеризуется вертикальной зональностью. В интервале 1981–1983 м горизонт сложен доломитами, ниже отметки 1984 м происходит смена литологии на терригенные породы. Песчаники имеют коричнево-серую и буровато-темно-серую окраску, кварцевый состав, среднезернистую структуру и массивную текстуру. Для пород характерен неровный раковистый излом и пониженная прочность, обусловленная карбонатным цементом контактового типа. В межзерновом пространстве наблюдается маслянистая жидкость бурого цвета с выраженным запахом углеводородов. Люминесцентно-битуминологический анализ показывает интенсивное свечение: 4 балла по голубовато-желтому люминесценту и 5 баллов по оранжево-коричневому свечению битуминозных ассоциаций.

Верхняя часть разреза (до 1984 м) характеризуется ухудшенными коллекторскими свойствами. При вскрытии пласта зафиксирован рост фоновых газопоказаний с 0,0021 до 0,534 %. Газовый состав отличается высоким содержанием метана (93,1 %) со значительной долей гомологов:  $C_2$  – 4,67 %,  $C_3$  – 0,93 %,  $C_4$  – 0,70 %,  $C_5$  – 0,60 %.

Лабораторные исследования керна выявили высокие ФЕС песчаников: открытая пористость варьирует от 7 до 27,5 % (среднее – 14,4 %), проницаемость достигает 837,10 мД (среднее – 686,54 мД). Анализ остаточной насыщенности показывает преобладание газовой фазы: водонасыщенность составляет 6,9–49,9 % (среднее – 24,4 %), нефтенасыщенность – 0–14,7 % (среднее – 4,6 %), газонасыщенность –



35,5–92,2 % (среднее – 71 %). Установлена гидрофильная природа коллектора.

С глубины 1998 м наблюдается увеличение интенсивности люминесцентного свечения в ультрафиолетовом спектре с изменением цвета от оранжево-желтого до светло-коричневого, что свидетельствует об изменении состава битумоидов. Зависимость «пористость–проницаемость» демонстрирует прямую корреляционную связь (0,32 – умеренная положительная корреляция), характерную для терригенных коллекторов региона (рис. 3).

Результаты ГИС характеризуют коллектор пласта  $Vbk_1^{bt}$  как неоднородный по своим ФЕС и характеру насыщения. Значения удельного электрического сопротивления демонстрируют значительный разброс от 1,65 до 485,08 Ом\*м при среднем значении 162,5 Ом\*м, что указывает на переменную нефтегазонасыщенность и литологическую неоднородность разреза. Расчетные по данным ГИС параметры показывают: пористость  $K_n^{ГИС}$  10–14 % (среднее – 12 %), проницаемость  $K_{пр}^{ГИС}$  289,5–779,6 мД (среднее – 521,5 мД), нефтегазонасыщенность  $K_{не}^{ГИС}$  7–98 % (среднее – 53 %).

Результаты опробования пластов на кабеле позволили верифицировать интерпретацию ГИС и выявить вертикальную зональность распределения флюидов:

– интервал 1983,01–1996,1 м: установлен приток газа;

– интервал 1997,1–1998,1 м: зафиксирован приток нефти;

– глубина 1999 м: отмечен двухфазный приток нефти с водой;

– интервал 2000,1–2017,1 м: установлен водонасыщенный характер коллектора.

*Петрофизическая характеристика пласта  $Vcr^d$  (Талахский горизонт).* Литологическое строение Талахского горизонта отличается значительной сложностью и неоднородностью. В интервале 2077–2091 м преобладают аргиллиты с единичными прослоями песчаника. Интервал 2092–2099 м характеризуется частым переслаиванием песчаников и аргиллитов. Наиболее перспективный интервал 2100–2105 м сложен песчаниками коричнево-серого и бурого цвета кварцевого состава, со среднезернистой структурой, массивной и слабо выраженной полосчатой текстурой. Породы имеют неровный раковистый излом и среднюю крепость, что обусловлено карбонатным цементом порово-контактного типа. При визуальном изучении керна отмечаются признаки углеводородов. Люминесцентно-битуминологический анализ показывает умеренную и интенсивную битуминизацию: 4 балла – по оранжево-желтому массивному свечению и 5 баллов – по оранжевому свечению битуминозных ассоциаций.

При вскрытии пласта зарегистрирован рост газопоказаний с 0,2220 до 0,8700 %. Газовый состав характеризуется доминиро-

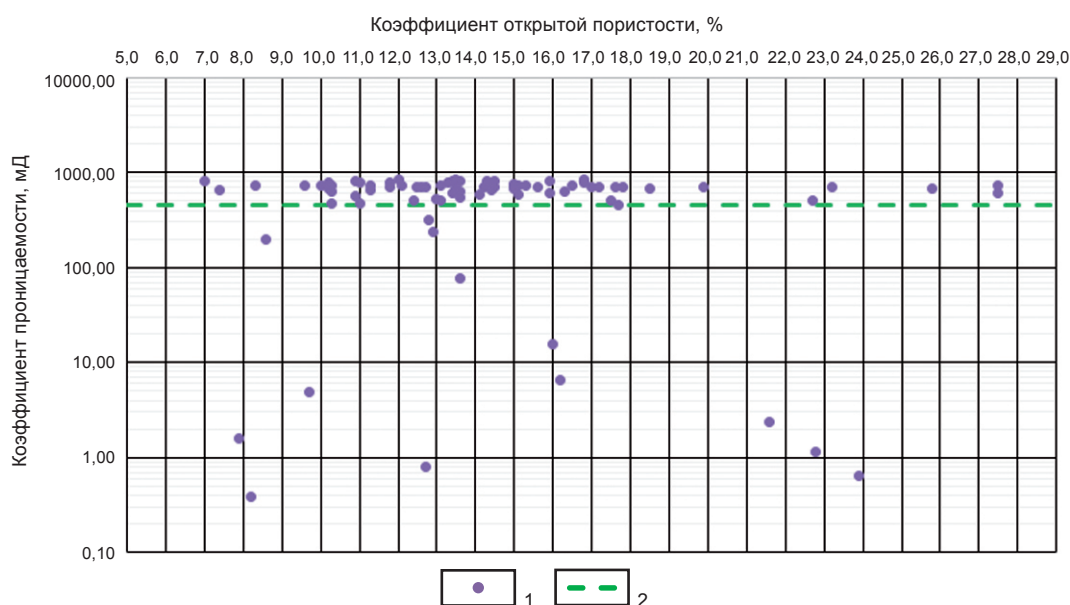


Рис. 3. Соотношение коэффициентов открытой пористости и абсолютной проницаемости  $K_n/K_{пр}$  песчаников в пласте  $Vbk_1^{bt}$ :

1 – Ботубинский; 2 – условная граница коэффициента абсолютной проницаемости

Fig. 3. Effective porosity  $K_n$  / absolute permeability  $K_{пр}$  ratio of sandstones in  $Vbk_1^{bt}$  formation:

1 – Botuobinsky; 2 – conditional limit of the absolute permeability coefficient



ванием метана (95,47 %) с незначительным содержанием этана (4,53 %) и практически отсутствием тяжелых гомологов ( $C_3-C_5 = 0$  %).

Экспресс-петрофизические исследования керна выявили низкие коллекторские свойства песчаников: пористость не превышает 4,8 % (среднее – 2,8 %), проницаемость варьирует в диапазоне 2,6–4,9 мД (среднее – 3,5 мД). Анализ остаточной насыщенности показывает преобладание газовой фазы: водонасыщенность составляет 15,13–42,07 % (среднее – 32,6 %), нефтенасыщенность – 3,03–14,08 % (среднее – 7,18 %), газонасыщенность – 48,18–80,82 % (среднее – 60,22 %). Образцы демонстрируют смешанный характер смачиваемости (гидрофильный и гидрофобный).

Критически важным результатом является отсутствие корреляционной зависимости между пористостью и проницаемостью (0,19), что указывает на изолированный характер пор и отсутствие сообщаемости между ними (рис. 4).

Данные ГИС показывают расхождение с лабораторными измерениями: расчетные значения пористости (7–14 %) и проницаемости (9,6–124,9 мД) существенно завышены относительно керновых данных, что может быть связано с влиянием глинистой компоненты и особенностями применяемых интерпретационных моделей. Расчетная нефтегазонасыщенность не превышает 45 %.

Результаты опробования на кабеле на глубине 2093,5 м подтвердили водонасыщенный характер коллектора – получен приток пластовой воды.

Таким образом, комплексный анализ данных позволяет заключить, что песчаники Талахского горизонта, несмотря на наличие остаточной углеводородной насыщенности, характеризуются низкими ФЕС и изолированным характером порового пространства, что исключает их продуктивность на изученной площади. Расхождение между керновыми и геофизическими данными подчеркивает необходимость использования комплекса методов исследования для достоверной оценки потенциала сложнопостроенных коллекторов.

Проведенный комплексный анализ трех продуктивных горизонтов выявил принципиальные различия в их фильтрационно-емкостных и флюидальных характеристиках, определяющие промышленный потенциал и подходы к их освоению. Осинский горизонт ( $E_1b^{lo-II}$ ), представленный карбонатными породами, демонстрирует крайне низкие показатели пористости (3,4 %) и проницаемости (0,42 мД) матрицы, однако благодаря развитой трещиноватости и признакам газонасыщенности относится к категории продуктивных. Ботубинский горизонт ( $Vbk_1^{bt}$ ) характеризуется высококачественными терригенными коллекторами с исключительно благоприятными ФЕС (где пори-

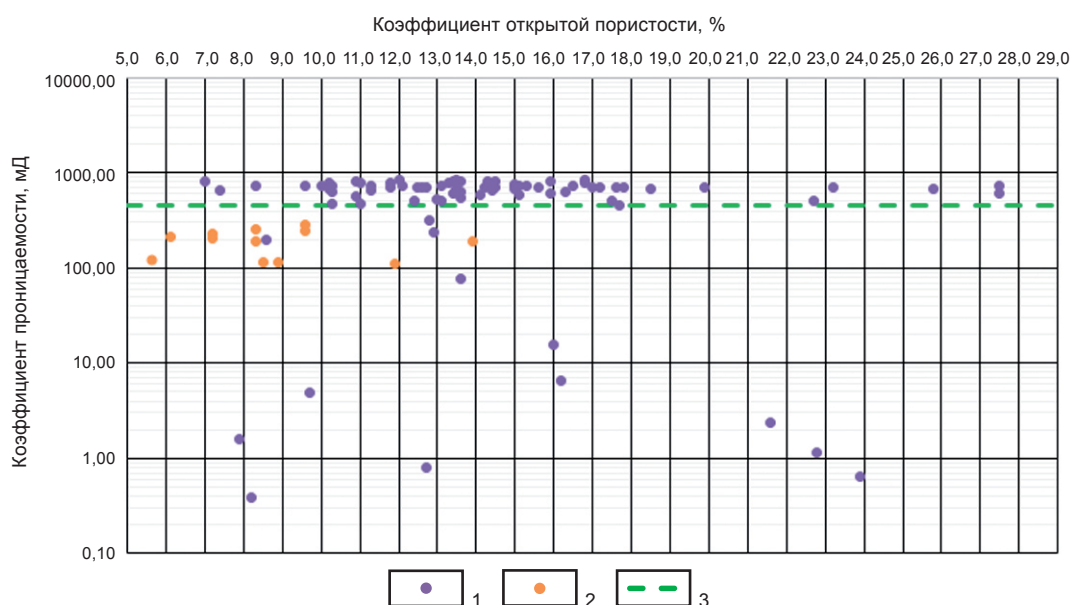


Рис. 4. Соотношение коэффициентов открытой пористости и абсолютной проницаемости  $K_n/K_{np}$  песчаников в пласте  $Vcr^d$ :

1 – Ботубинский; 2 – Талахский; 3 – условная граница коэффициента абсолютной проницаемости

Fig. 4. Effective porosity  $K_n$  / absolute permeability  $K_{np}$  ratio of sandstones in the  $Vcr^d$  formation:

1 – Botubinsky; 2 – Talahsky; 3 – conditional limit of the coefficient of absolute permeability



стость – 14,4 %, проницаемость – 686,54 мД) и четкой вертикальной зональностью распределения флюидов: газонасыщенная верхняя часть (до ~1997 м) сменяется нефтеносной зоной, подстилаемой водонасыщенными породами. Талахский горизонт ( $V_{cr}^{tl}$ ), несмотря на наличие остаточной углеводородной насыщенности, обладает изолированным поровым пространством и низкими фильтрационными свойствами (проницаемость – 3,5 мД), что исключает его промышленную значимость.

### Заключение

Проведенные комплексные экспресс-петрофизические исследования керн на скважине Тас-Юряхского нефтегазоконденсатного месторождения позволили дать обоснованную характеристику ФЕС трех продуктивных горизонтов и оценить их промышленный потенциал.

В результате работ установлены принципиальные различия в строении пустотного пространства и фильтрационных возможностях изученных коллекторов. Ботубинский горизонт идентифицирован как высококаче-

ственный терригенный коллектор с исключительно благоприятными ФЕС, демонстрирующий прямую корреляционную связь между пористостью и проницаемостью и четкую вертикальную зональность распределения газовой и нефтяной фазы. Напротив, для Осинского горизонта, сложенного карбонатными породами, выявлен парадокс низкой проницаемости матрицы при одновременных признаках углеводородного насыщения, что указывает на трещинный тип коллектора, где фильтрация осуществляется преимущественно по системе трещин. Талахский горизонт характеризуется изолированным поровым пространством и низкими ФЕС, что, несмотря на наличие остаточной битуминизации, исключает его промышленную ценность.

Полученные результаты имеют важное практическое значение, предоставляя достоверную петрофизическую основу для построения геологической модели месторождения, подсчета запасов и планирования технологических схем разработки с учетом специфики каждого типа коллектора.

### Список источников

1. Авчян Г.М., Матвеев А.А., Стефанкевич З.Б. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях. М.: Недра, 1979. 224 с.
2. Некрасов А.С. Геолого-геофизические исследования карбонатных коллекторов нефтяных месторождений. Пермь: Пермский гос. ун-т; ООО «ПермНИПИнефть», 2006. 422 с.
3. Багринцева К.И., Бочко Р.А., Дмитриевский А.Н. Атлас карбонатных коллекторов месторождений нефти и газа Восточно-Европейской и Сибирской платформ. СПб.: ОАО «Иван Федоров», 2003. 264 с.
4. Дорогиницкая Л.М., Еникеев Б.Н., Ефимов В.А., Исаев Г.Д., Костеневич К.А., Мальшаков А.В. [и др.]. Актуальные вопросы петрофизики сложнопостроенных коллекторов. Краснодар: Просвещение-Юг, 2010. 306 с.
5. Кобрунов А.И., Кулешов В.Е., Могутов А.С., Художилова А.Н. Метод нечетких петрофизических композиций при прогнозировании петрофизических параметров // Вестник. 2011. № 9. С. 18–23.
6. Гулари Ф.Г., Гулари И.Ф. Формирование залежей нефти в аргиллитах баженовской свиты Западной Сибири // Геология нефти и газа. 1974. № 5. С. 36–40.
7. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности горных пород. М.: Недра, 1985. 310 с.
8. Кошкарлова Е.Ф., Наумов В.А., Бухарова И.А., Тихонова К.В., Чиргун А.С. Неоднозначность определения нефтегазонасыщенности карбонатных коллекторов осинского горизонта и пути решения данной проблемы // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 6. С. 32–36. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2023-6-32-36>. EDN: BFKLUA.
9. Оленич П.А., Бухарова И.А., Новикова М.С., Хорольский Г.О., Чиргун А.С. Геологическое строение и перспективы нефтегазонасыщенности Юряхского горизонта Среднеботубинского месторождения // Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 6. С. 58–61. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2021-6-58-61>. EDN: TGPBYD.
10. Дорофеева Т.В., Лебедев Б.А., Петрова Т.В. Особенности формирования коллекторских свойств баженовской свиты Салымского месторождения // Геология нефти и газа. 1979. № 9. С. 20–23.
11. Lemeshko M.N., Potseluev A.A., Shaldybin M.V., Lemeshko D.I. Criteria for local forecast of reservoir formations in carbonate vendian-cambrian deposits of the Ust-Kutskian horizon // Georesursy. 2017. Vol. 19. Iss. 2. P. 122–128. <https://doi.org/10.18599/grs.19.2.6>. EDN: YZBIER.
12. Багринцева К.И. Трещиноватость осадочных пород. М.: Недра, 1982. 241 с.
13. Жуков В.С., Плешков И.В. Влияние водонасыщенности на изменение физических свойств коллектора // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2018. № 5. С. 121–128. EDN: WJYMOE.
14. Бутова И.А. Карбонатные коллекторы Вендско-Нижнекембрийского нефтегазонасыщенного комплекса Восточной Сибири // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 2. С. 4. EDN: OYQEPB.
15. Жуков В.С. Динамика физико-механических свойств горных пород (динамическая петрофизика) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 9. С. 59–63. EDN: MURLKT.



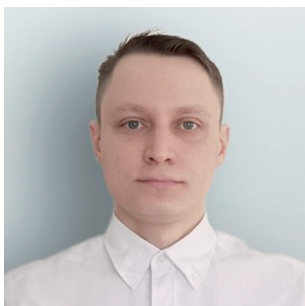
16. Жуков В.С. Основные причины изменения комплекса физических свойств коллекторов при разработке месторождений углеводородов // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2014. № 4. С. 174–183. EDN: TEWWHZ.
17. Жуков В.С., Семенов Е.О., Кузьмин Ю.О. Динамика физических свойств коллекторов при разработке месторождений нефти и газа // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2018. № 5. С. 82–99. EDN: GNVFFO.
18. Золоева Г.М., Фарманова Н.В., Царева Н.В., Куликов Б.Н., Силина Л.В. Изучение карбонатных коллекторов методами промысловой геофизики. М.: Недра, 1977. 177 с. EDN: YWQQVN.
19. Чуриков Ю.М., Пылев Е.А., Поляков Е.Е. Обобщенные зависимости между фильтрационно-емкостными и физическими свойствами вендских отложений на месторождениях, входящих в газотранспортную систему «Сила Сибири» // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2019. № 4. С. 106–120. EDN: CCJTDV.
20. Мухидинов Ш.В., Беляков Е.О. Привлечение результатов петрографического анализа шлифов при обосновании методики выделения коллекторов в условиях терригенных пород с вторичными процессами минералообразования (на примере одного из месторождений Восточной Сибири) // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2018. № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-1-28-35>. EDN: YRNXZV.

### References

1. Avchyan G.M., Matveenkov A.A., Stefankevich Z.B. *Petrophysics of sedimentary rocks in deep-ground conditions*. Moscow: Nedra; 1979, 224 p. (In Russ.).
2. Nekrasov A.S. *Geological and geophysical studies of carbonate reservoirs of oil fields*. Perm: Perm State University; PermNIPIneft LLC; 2006, 422 p. (In Russ.).
3. Bagrintseva K.I., Bochko R.A., Dmitrievsky A.N. Atlas of carbonate reservoir rocks of the oil and gas fields. St. Petersburg: JSC "Ivan Fedorov"; 2003, 264 p. (In Russ.).
4. Doroginskaya L.M., Yenikeev B.N., Efimov V.A., Isaev G.D., Kostenevich K.A., Malshakov A.V., et al. *Current issues in petrophysics of complex reservoirs*. Krasnodar: Prosveshchenie-Yug; 2010, 306 p. (In Russ.).
5. Kobrunov A.I., Kuleshov V.E., Mogutov A.S., Hudojilova A.N. Method of fuzzy petrophysical compositions when forecasting petrophysical parameters. *Vestnik*. 2011;9:18-23. (In Russ.).
6. Gurari F.G., Gurari I.F. Oil deposit formation in mudstones of the Bazhenov formation of Western Siberia. *Russian Oil and Gas Geology*. 1974;5:36-40. (In Russ.).
7. Dakhnov V.N. *Geophysical methods for determining reservoir properties and oil and gas saturation of rocks*. Moscow: Nedra; 1985, 310 p. (In Russ.).
8. Koshkarova E.F., Naumov V.A., Bukharova I.A., Tikhonova K.V., Chirgun A.S. Debatable interpretation of hydrocarbon saturation of Osinsky carbonate reservoirs and solution methods. *Oil and Gas Exposition*. 2023;6:32-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2023-6-32-36>. EDN: BFKLUA.
9. Olenich P.A., Bukharova I.A., Novikova M.S., Khorolsky G.O., Chirgun A.S. Geological structure and oil and gas potential of the Yuryakha horizon of Srednebotuobinskoye field. *Oil and Gas Exposition*. 2021;6:58-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2021-6-58-61>. EDN: TGPBYD.
10. Dorofeeva T.V., Lebedev B.A., Petrova T.V. Formation features of Bazhenov strata reservoir properties of the Salym deposit. *Russian Oil and Gas Geology*. 1979;9:20-23. (In Russ.).
11. Lemeshko M.N., Potseluev A.A., Shaldybin M.V., Lemeshko D.I. Criteria for local forecast of reservoir formations in carbonate Vendian-Cambrian deposits of the Ust-Kutskian horizon. *Georesursy*. 2017;19(2):122-128. <https://doi.org/10.18599/grs.19.2.6>. EDN: YZBIER.
12. Bagrintseva K.I. *Fracturing of sedimentary rocks*. Moscow: Nedra; 1982, 241 p. (In Russ.).
13. Zhukov V.S., Pleshkov I.V. Water saturation impact to changing of physical properties of a reservoir. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2018;5:121-128. (In Russ.). EDN: WJYMOE.
14. Burova I.A. Carbonate reservoirs of the Vendian-Lower Cambrian petroleum complex, Eastern Siberia. *Petroleum Geology - Theoretical and Applied Studies*. 2010;5(2):4. (In Russ.). EDN: OYQEPB.
15. Zhukov V.S. Dynamics of physical and mechanical properties of rocks (dynamic petrophysics). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2002;9:59-63. (In Russ.). EDN: MURLKT.
16. Zhukov V.S. Principal causes of change of a complex of physical properties of producing formation by oil and gas fields development. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2014;4:174-183. (In Russ.). EDN: TEWWHZ.
17. Zhukov V.S., Semenov Ye.O., Kuzmin Yu.O. Dynamics of physical properties of reservoirs at development of oil and gas fields. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2018;5:82-99. (In Russ.). EDN: GNVFFO.
18. Zoloeva G.M., Farmanova N.V., Tsareva N.V., Kulikov B.N., Silina L.V. *Study of carbonate reservoirs by methods of field geophysics*. Moscow: Nedra; 1977, 177 p. (In Russ.). EDN: YWQQVN.
19. Churikov Yu.M., Pylev Ye.A., Polyakov Ye.Ye. Generalized dependencies between reservoir and physical properties of Vendian deposits at fields associated with the "Power of Siberia" gas transportation system. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2019;4:106-120. (In Russ.). EDN: CCJTDV.
20. Mukhidinov Sh.V., Belyakov E.O. Involving the results of petrographic analysis of thin sections when justifying the methodology for isolating reservoirs in terrigenous rocks with secondary mineral formation processes (a study of one of the deposits in Eastern Siberia). *Oil and Gas Studies*. 2018;1:28-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2018-1-28-35>. EDN: YRNXZV.



### Информация об авторе / Information about the author



**Белькович Михаил Леонидович**,  
аспирант,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ belkovichmikhail@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-9979-7445>  
**Mikhail L. Belkovich**,  
Postgraduate Student,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ belkovichmikhail@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0002-9979-7445>

### Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflict of interests.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by the author.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 21.01.2026; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 04.03.2026.

The article was submitted 21.01.2026; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 04.03.2026.



Научная статья

УДК 624.127

EDN: OEIRQU

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-2



## Исследование физико-механических свойств и методы повышения прочности бетонной шахтной крепи при влиянии агрессивных факторов внешней среды

И.В. Перельгин<sup>a✉</sup>, А.Ю. Болотнев<sup>b</sup><sup>a,b</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

**Резюме.** Существуют различные способы крепления подземных горных выработок, каждый из этих способов имеет ряд преимуществ и недостатков. Наиболее универсальным себя зарекомендовало крепление, в составе которого имеется бетонная смесь (набрызг и торкрет – бетонная крепь, железобетонная крепь и т. д.). На данный момент множество рудников и шахт используют бетонную смесь для сооружения различных упрочняющих конструкций в условиях подземной разработки месторождения, требующих очень тщательного подхода, при всем этом горнодобывающие предприятия зачастую сталкиваются с такой проблемой, как потеря бетоном своих прочностных характеристик в процессе эксплуатации. Целью данного исследования являлась наиболее точная оценка поведения бетона при различных агрессивных факторах внешней среды, таких как растепление массива горных пород и наличие агрессивных вод в месте установки крепления. Также в работе рассмотрены возможные методы повышения прочности и устойчивости к тем или иным разрушающим факторам. Исследования включали в себя испытания бетона на морозостойкость, а также проведение «электролизных» испытаний, добавление различных компонентов для повышения прочности бетонных образцов, а также сравнение различных марок бетона. Полученные результаты помогли дать более точную оценку влияния негативных факторов на физико-механические свойства бетонной крепи, дали возможность подобрать комплексный подход к повышению устойчивости крепления в различных условиях подземной среды.

**Ключевые слова:** бетон, бетонные образцы, М400, агрессивная среда, растепление массива горных пород

**Для цитирования:** Перельгин И.В., Болотнев А.Ю. Исследование физико-механических свойств и методы повышения прочности бетонной шахтной крепи при влиянии агрессивных факторов внешней среды // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 18–29. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-2>. EDN: OEIRQU.

Original article

## Study of physico-mechanical properties and methods for increasing the strength of concrete shaft supports under the influence of aggressive environmental factors

Ivan V. Perelygin<sup>a✉</sup>, Aleksandr Yu. Bolotnev<sup>b</sup><sup>a,b</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** There are various methods of supporting underground mine workings, each of these methods has a number of advantages and disadvantages. The most versatile method has proven to be the support that includes a concrete mixture (shotcrete and gunite – concrete support, reinforced concrete support, etc.). Today, many mines and mining enterprises use concrete mixtures to construct various structures in the conditions of underground mining, while mining enterprises often face the problem of concrete losing its strength characteristics during operation. The purpose of the study is to provide the most accurate assessment of concrete behavior under various aggressive environmental factors, such as thawing of the rock mass and the presence of aggressive waters at the support installation site. The paper also discusses possible methods for increasing strength and resistance to various destructive factors. The research included testing concrete for frost resistance, conducting electrolysis tests, adding various components to increase the strength of concrete samples, as well as comparing different concrete grades. The obtained results allowed to provide a more accurate assessment of the influence of negative factors on the physical and mechanical properties of concrete support, as well as to select an integrated approach to increasing the stability of support under various conditions of underground environment.

**Keywords:** concrete, concrete samples, M400, aggressive environment, thawing of rock mass

**For citation:** Perelygin I.V., Bolotnev A.Yu. Study of physico-mechanical properties and methods for increasing the strength of concrete shaft supports under the influence of aggressive environmental factors. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):18-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-2>. EDN: OEIRQU.



## Введение

Обеспечение безопасности при производстве подземных горных работ – это один из самых важных аспектов при введении в эксплуатацию горнодобывающих предприятий, занимающихся разработкой месторождений полезных ископаемых подземным способом добычи. Одним из этапов по обеспечению безопасности горных работ в условиях подземной разработки месторождений является возведение шахтной крепи [1]. В современной практике наиболее универсальной себя показала шахтная крепь, в составе которой имеется бетон (набрызг и торкрет – бетонные крепи, железобетонная крепь, бетонная крепь), такую крепь могут использовать для горизонтальных, наклонных, а также вертикальных выработок различного сечения [2]. Бетонная крепь по сравнению с другими видами крепления имеет низкую себестоимость, а также более высокие прочностные характеристики, которые и делают ее наиболее универсальной по сравнению с другими способами крепления [3]. Однако существует ряд негативных факторов, которые оказывают отрицательное влияние на прочностные характеристики бетона, и с течением определенного времени полностью разрушают его. Наиболее выраженными агрессивными факторами, влияющими на разрушение бетона, являются агрессивные воды, содержащие в себе различные химические элементы [4–6] и перепады температур, особенно в рудниках, находящихся в условиях вечной мерзлоты [7, 8]. В связи с нарастающей тенденцией перехода с рельсового на самоходный транспорт, который в большинстве своем оснащен дизельными двигателями (температура отработки газов, поступающих в атмосферу из такого агрегата, может достигать 400 °С), происходит значительный перепад температур, что в последствии и вызывает растрескивание массива горных пород [9]. Такие негативные факторы могут повлечь за собой значительные разрушения и повреждения материалов, оборудования и несущих конструкций, что помешает своевременному выполнению работ на горном производстве, значительно повысит риск травмирования работников на рабочем месте, а также приведет к дополнительным расходам на восстановление этих конструкций [10].

## Материалы и методы исследования

Для изучения влияния негативных факторов горно-шахтной среды на бетонную крепь, а также для выявления возможных методов повышения устойчивости к негативным факторам проведены следующие испытания:

- морозостойкость бетона;
- использование разных марок цемента;
- добавление строительной фибры в состав бетона;
- влияние коррозии на железобетонные образцы;
- применение композитной сетки в составе бетона.

*Морозостойкость бетона.* Эксперимент проведен в соответствии с ГОСТ 10060-2012<sup>1</sup> [11]. Для получения оптимальной прочности бетонного образца необходимо учитывать пропорции, предложенные заводом-изготовителем используемого цемента, для изготовления одного образца размерами 100×100×100 мм использованы следующие пропорции [12]:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл.

В последующем изготовлено 12 экспериментальных бетонных образцов; после заливки (для достижения максимальных прочностных характеристик) образцы набирали прочность при комнатной температуре в течение 28 суток. Далее проводились циклы морозостойкости путем помещения их в среду с отрицательной температурой на 2 ч, по истечении времени образцы помещались в воду комнатной температуры, на такое же время (рис. 1). Всего проведено 50 циклов морозостойкости.

После 50 циклов морозостойкости, проведены испытания прочности на одноосное сжатие на испытательном прессе марки ИП-500М. Результаты сравнения представлены на рис. 5, а.

*Использование различных марок цемента.* В ходе эксперимента использовался цемент марок М400 и М600, далее полученные образцы также были испытаны на морозостойкость. Для получения бетонного образца М600 размерами 100×100×100 мм использовались пропорции, предложенные заводом-изготовителем [13]:

- цемент М600 – 528 г;
- песок – 456 г;
- вода – 265 мл.

<sup>1</sup> ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. М.: Стандартинформ, 2018. 25 с.



a



b

**Рис. 1. Цикл морозостойкости с бетонными образцами:**

a – бетонные образцы находятся в воде комнатной температуры;  
b – бетонные образцы находятся в условиях отрицательной температуры

**Fig. 1. Freeze-thaw cycle with concrete samples:**

a – concrete samples kept in water at room temperature;  
b – concrete samples kept under subzero temperatures

Пропорции для получения бетонных образцов марки М400:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл.

Для достижения своих максимальных прочностных свойств образцы набирали прочность в течение 28 суток. Далее бетонные образцы испытывались на морозостойкость в количестве 50 циклов. Результаты сравнения представлены на рис. 5, b.

*Добавление строительной фибры в состав бетона.* Для проведения опыта исполь-

зовались два вида строительной фибры – базальтовая и полипропиленовая (рис. 2).

Базальтовая фибра представляет собой небольшие отрезки базальтовых волокон, ее непосредственным преимуществом по сравнению с другими видами строительной фибры является стойкость к агрессивным средам, в том числе к экстремальному перепаду температур [14]. Полипропиленовая фибра, напротив, исполнена в виде волокон полипропиленовой нити, также отрезками небольшой длины. Данный вид фибры наиболее устойчив к пластическим деформациям [15, 16]. При про-



a



b

**Рис. 2. Виды строительной фибры:**

a – базальтовая фибра; b – полипропиленовая фибра

**Fig. 2. Types of construction fiber:**

a – basalt fiber; b – polypropylene fiber



ведении опыта также использовался цемент марки М400, пропорции бетона и введенной в его состав строительной фибры взяты в соответствии с заводом-изготовителем:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл;
- полипропиленовая/базальтовая фибра –

5 г.

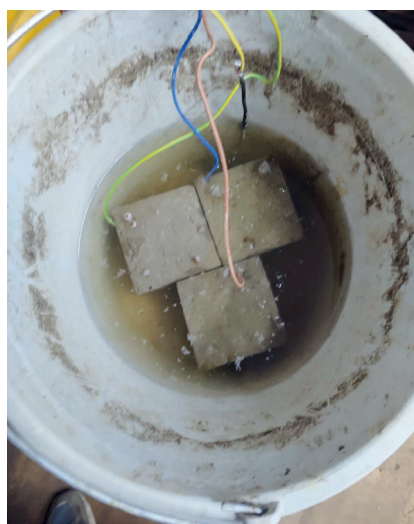
Пропорции взяты для изготовления одной единицы бетонного образца размерами 100×100×100 мм. Как и ранее, образцы набирали прочностные свойства в течение 28 суток и были испытаны на прочность на одноосное сжатие, с помощью испытательного пресса ИП-500М. Результаты сравнения представлены на рис. 5, с.

**Влияние коррозии на железобетонные образцы.** Коррозия – процесс, происходящий в течение длительного времени, даже при наличии агрессивных условий требуется несколько недель или месяцев для выявления каких-либо изменений, с целью ускорения процесса коррозии проведены электролизные испытания [17]. Электролиз представляет собой физико-механический процесс, при котором электрический ток, проходя через электролит, вызывает разложение вещества на его составные части. При данном испытании электролиз помогает в несколько раз увеличить скорость протекания процесса коррозии.

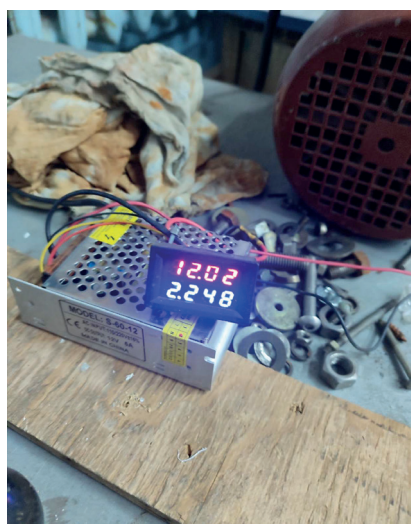
**Порядок проведения электролизных испытаний.** В сосуд с раствором воды и соли (соотношение 40 г/л) помещены экспериментальные образцы бетона, в составе которого находится стальная арматурная сетка. К выступающим концам стали приспособлен медный провод, по которому идет электрический ток (подаваемый ток составил 2–3 А, а подаваемое напряжение – в районе 12 В). Второй медный провод, также идущий от источника тока, приспособлен к металлической пластине, которая тоже находится в заготовленном растворе воды и соли. В этой конструкции металлическая пластина является катодом, а арматурная сетка в составе образца бетона – анодом. Вследствие окислительно-восстановительных реакций арматурная сетка за небольшой период времени покрывается налетом коррозии [18, 19] (рис. 3).

По истечении определенного времени (2 и 4 ч) образцы испытаны на прочность на одноосное сжатие, испытания проводились с использованием пресса марки ИП-500М.

Для контроля потерь прочности, а также визуального сравнения арматурной сетки в составе бетона изготовлены эталонные образцы железобетона, и образцы железобетона, для электролизных испытаний, итого 12 штук. Для изготовления железобетонного образца использовался также цемент марки М400.



а



б



с

**Рис. 3. Электролизные испытания:**

а – железобетонные образцы, находящиеся в растворе NaCl; б – напряжение и ток, подаваемые на образцы; с – железобетонные образцы, подверженные коррозии

**Fig. 3. Electrolysis tests:**

а – reinforced concrete samples in NaCl solution; б – voltage and current applied to the samples; с – reinforced concrete samples undergoing corrosion



- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл;
- стальная арматурная сетка – 47 г.

В табл. 1, 2 представлены значения размеров, нагрузки и напряжения в железобетонных образцах.

*Применение композитной сетки в составе бетона.* Использование композитных материалов в составе бетонной смеси для возведения шахтной крепи на данный момент не получило широкого применения в горнодобывающей отрасли и требует дополнительных исследований, поскольку поведение композитов в условиях высоких нагрузок и длительного воздействия горного давления изучено недостаточно [20]. Однако в последние десятилетия современные полимерные композиты, а также конструкции и изделия из них находят более широкое применение в строительной индустрии. Для изготовления образцов использовалась обычная композитная сетка из полимерных материалов (рис. 4).

В качестве составляющих компонентов использовались цемент марки М400, песок и вода в следующих пропорциях:

- цемент М400 – 492 г;
- песок – 661 г;
- вода – 207 мл;
- композитная сетка – 25 г.

Для проведения эксперимента изготовлено 6 образцов бетона, в составе которых имеется композит. Композитная сетка имеет наименьший удельный вес, по сравнению со стальной арматурной сеткой, при этом стоит отметить, что композит не подвержен коррозии, так как подвержена сталь. Результаты испытания представлены в табл. 3.

### Результаты исследования и их обсуждение

*Исследование морозостойкости бетона.* Значение давления рассчитано в соответствии с ГОСТ 10180-2012<sup>2</sup>. Эталонный размер образца – 100×100×100 мм. Средняя нагрузка на образцы бетона марки М400 составляет 146,3 кН, усредненное значение напряжения, действующего на образцы, равно 13,5 МПа. Средняя нагрузка на бетонные образцы марки М400 после проведения циклов морозостойкости составила 90,28 кН, средний показатель давления – 8,58 МПа, при



a



b

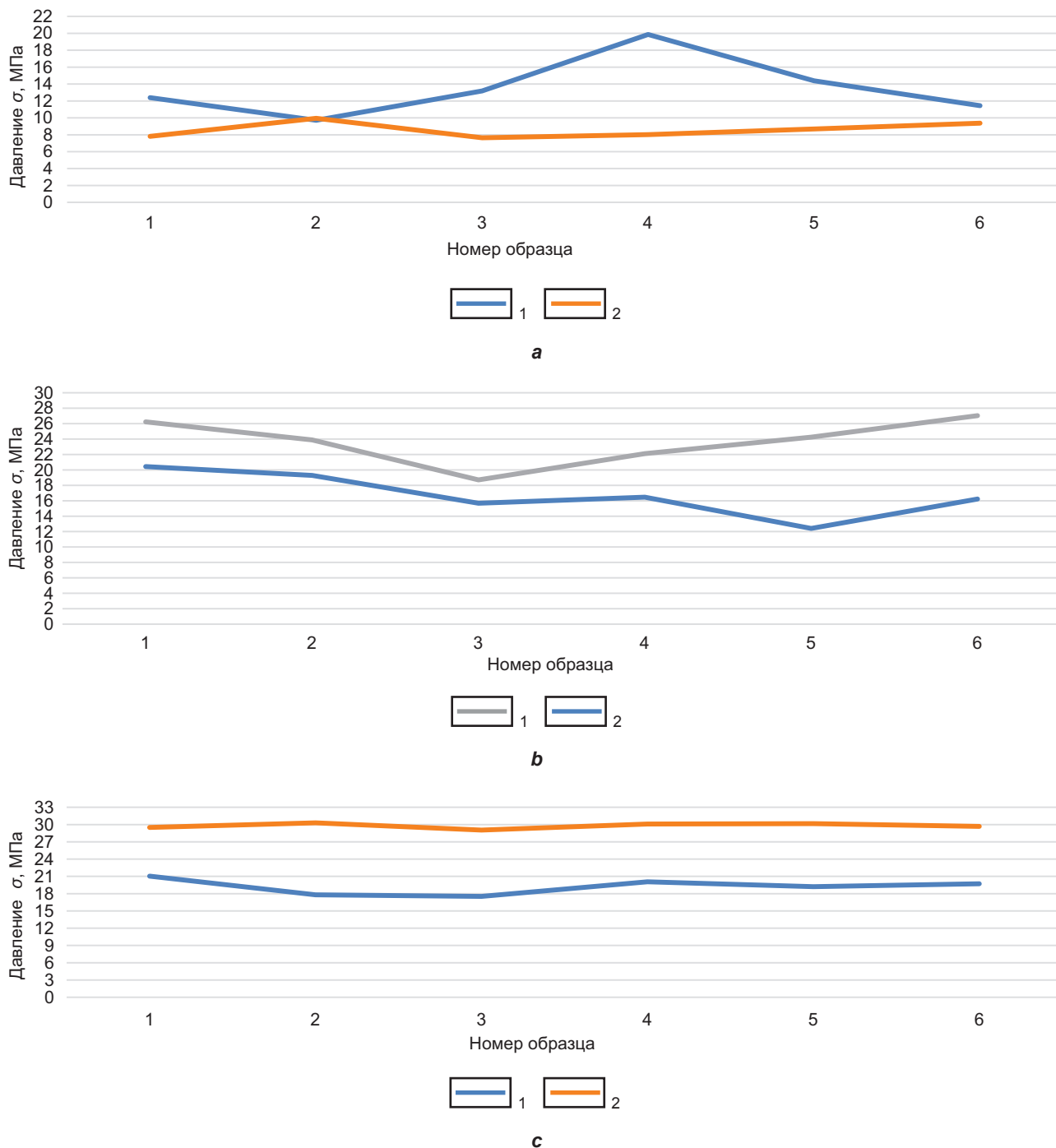
**Рис. 4. Композитная сетка в составе бетона:**

a – вид композитной сетки, добавляемой в раствор бетона; b – композитная сетка в разрушенном образце

**Fig. 4. Composite mesh in concrete composition:**

a – type of composite mesh added to the concrete mix; b – composite mesh in the destroyed sample

<sup>2</sup> ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013. 31 с.



**Рис. 5. Графики зависимости давления, действующего на образцы бетона:**  
а – марки М400 до (1) и после (2) испытаний на морозостойкость;  
б – марки М400 (1) и М600 (2);  
с – марки М400 с добавлением в состав полипропиленовой (1) и базальтовой (2) фибры  
**Fig. 5. Dependence diagrams of the pressure acting on concrete samples:**  
а – grade М400 before (1) and after (2) freeze-thaw resistance tests;  
б – grades М400 (1) and М600 (2);  
с – grade М400 with polypropylene (1) and basalt (2) fibers added in the mix

этом показатель после испытаний на морозостойкость упал почти на 39 %.

Сравнение двух различных марок бетона. Брали эталонный размер образца 100×100×100 мм. По итогам сравнения проч-

ности двух марок бетона наиболее прочным оказался бетон марки М600, образцы этой марки выдержали среднюю нагрузку, равную 299,5 кН, при этом среднее напряжение в образцах составляет 23,7 МПа, что выше на



74 %. Также бетон марки М600 оказался наиболее морозостойким по сравнению с бетоном марки М400. После проведения циклов морозостойкости средняя нагрузка на бетонные образцы этой марки составила 219,5 кН, а средний показатель давления – 16,75 МПа, по сравнению с эталонными образцами прочность упала на 27 %.

*Использование строительной фибры в составе бетона.* Был взят эталонный размер образца 100×100×100 мм. По итогу проведенных испытаний наиболее прочным оказался бетон марки М400 с использованием базальтовой фибры. Данные образцы смогли выдержать среднюю нагрузку в 313,13 кН, средний показатель давления на образец составил 29,8 МПа. Базальтовая фибра помогла повысить прочность почти в 2,5 раза, по сравнению с эталонными образцами бетона, в которых не было никаких дополнительных добавок.

*Влияние коррозии на железобетонные образцы.* В ходе сравнения прочности испытываемых образцов было установлено, что среднее напряжение в железобетонных образцах на сжатие составляет 26 МПа, что почти в 1,5 раза больше, чем напряжение в эталон-

ных образцах, среднее значение которых составило 18 МПа. При этом стоит отметить, что арматурная сетка не давала образцу разделиться на части даже после его разрушения.

Электролизные испытания помогли за небольшой промежуток времени добиться образования коррозии на поверхности арматурной сетки, при этом образцы были разделены на две части – это образцы, которые находились в растворе 2 и 4 ч. В результате испытаний на сжатие было установлено, что средняя прочность образцов, находящихся в растворе 2 ч, упала почти в 1,3 раза (среднее давление – 19,28 МПа), а прочность образцов, которые находились в растворе 4 ч, упала в 1,5 раза (среднее давление – 17,58 МПа).

*Использование в составе бетона композитного материала.* Сравнительный анализ прочности показал, что железобетонные образцы демонстрируют среднюю прочность на сжатие 25,99 МПа, что в 1,85 раза превышает показатель эталонных образцов (14 МПа), в свою очередь, образцы с композитной сеткой прочнее всего в 0,24 раза. Прочность же железобетонных образцов выше композитных на 81 %.

**Таблица 1. Характеристики образцов железобетона**  
**Table 1. Characteristics of reinforced concrete samples**

Номер опыта	Длина $a$ , мм	Ширина $b$ , мм	Высота $h$ , мм	Масштабный коэффициент $\alpha$	Нагрузка $F$ , кН	Давление $\sigma$ , МПа
1	100	100	96	0,96	238,041	22,85
2	100	95	100	0,95	254,406	25,44
3	100	100	95	0,95	341,573	32,45
4	100	100	96	0,96	238,308	22,88
5	97	98	100	0,97	227,741	23,24
6	97	95	100	0,92	291,142	29,07

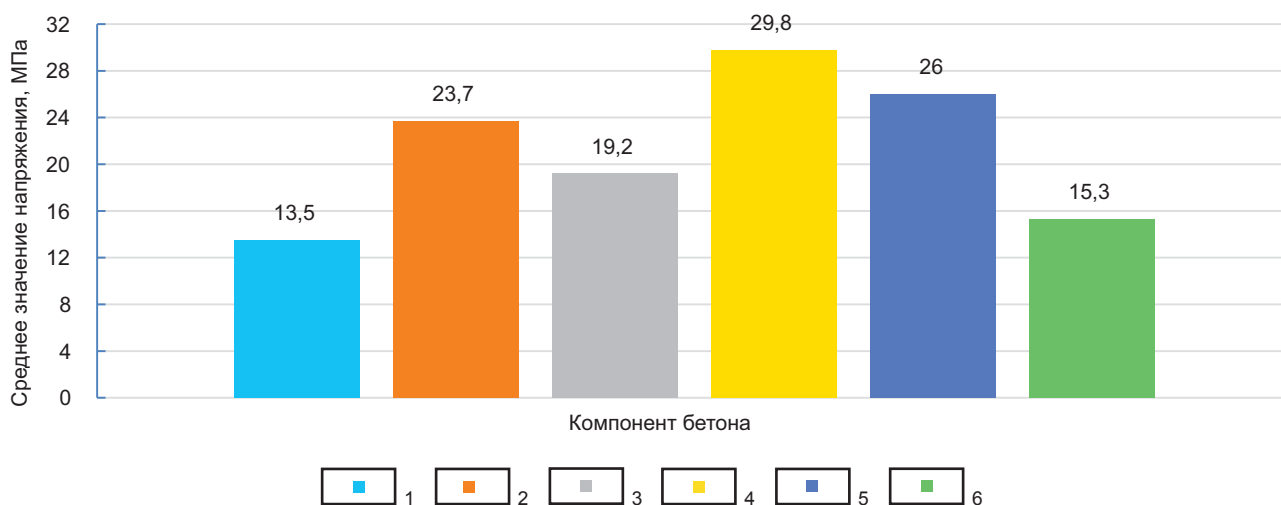
**Таблица 2. Характеристики образцов железобетона после проведения электролизных испытаний**  
**Table 2. Characteristics of reinforced concrete samples after electrolysis tests**

Номер опыта	Длина $a$ , мм	Ширина $b$ , мм	Высота $h$ , мм	Масштабный коэффициент $\alpha$	Нагрузка $F$ , кН	Давление $\sigma$ , МПа
2 ч						
1	96	99	95	0,99	179,294	18,67
2	99	104	100	0,99	192,683	18,71
3	102	98	100	0,98	204,509	20,46
4 ч						
4	101	100	99	0,99	183,413	17,98
5	97	105	103	0,94	188,220	17,37
6	100	100	97	0,97	183,795	17,39



**Таблица 3. Характеристики образцов бетона с композитной сеткой**  
**Table 3. Characteristics of concrete samples with composite mesh**

Номер опыта	Длина $a$ , мм	Ширина $b$ , мм	Высота $h$ , мм	Масштабный коэффициент $\alpha$	Нагрузка $F$ , кН	Давление $\sigma$ , МПа
1	100	102	100	0,98	157,411	15,12
2	100	100	98	0,98	151,552	14,85
3	100	101	100	0,99	157,353	15,42
4	95	103	100	0,97	174,101	17,25
5	100	103	97	0,94	154,784	14,12
6	100	100	100	1,00	152,146	15,21



**Рис. 6. График зависимости напряжения от компонентов, добавляемых в состав бетона:**

1 – М400; 2 – полипропиленовая фибра и М400; 3 – стальная арматура и М400;  
 4 – М600; 5 – базальтовая фибра и М400; 6 – композитная арматура и М400

**Fig. 6. Mechanical stress vs components added to the concrete:**

1 – M400; 2 – polypropylene fiber and M400; 3 – steel reinforcement and M400;  
 4 – M600; 5 – basalt fiber and M400; 6 – composite reinforcement and M400

Выше представлен график зависимости напряжения от компонентов, добавляемых в состав бетона (рис. 6).

Исходя из графика можно сделать вывод, что наиболее высокие показатели имеет бетон, в составе которого имеются:

- базальтовая фибра в совокупности с цементом М400;
- стальная арматура в совокупности с цементом М400;
- цемент М600.

Самый низкий показатель у бетона, в составе которого находился только цемент М400.

### Закключение

Экспериментальным путем удалось выявить ряд определенных особенностей, связанных с бетоном:

1. Постоянный перепад температур, иными словами, «растепление массива горных пород» негативным образом влияет на прочностные характеристики бетонной крепи, со временем бетон становится более хрупким, а также начинает терять свою прочность, при этом визуально бетонная конструкция остается неизменной, вследствие этого крепление быстро приходит в негодность, тем самым создается риск обрушения бортов и кровли выработок. Для предотвращения разрушения и потери прочности требуется более постоянная температура с наименьшими колебаниями. Особенно данная проблема актуальна для рудников и шахт, разработка которых ведется в условиях вечной мерзлоты.

2. Бетон марки М600 оказался более устойчив к перепадам температур по сравнению с бетоном марки М400, при этом образец в



результате потерял определенную часть прочностных свойств, что тоже говорит о его недостаточной морозостойкости, также образцы бетона марки М600 имеют наибольшую прочность в сравнении с бетоном марки М400, но его себестоимость во много раз выше, именно поэтому бетон марки М600 не используется для крепления горных выработок.

3. Использование таких добавок, как полипропиленовая и базальтовая фибра, напрямую помогает увеличить прочностные характеристики бетона, при этом наиболее лучшим образом показала себя базальтовая фибра в составе бетона М400, продемонстрировав наиболее высокие показатели прочности по сравнению со всеми остальными способами. При всем этом строительная фибра в несколько раз повышает морозостойкость бетона, в ходе проведения эксперимента потери прочности выявлено не было. По заявлениям завода-изготовителя базальтовой фибры, помимо морозостойкости, значительно повышается огнестойкость бетона, что характерно для рудников и шахт, которые ведут разработку в условиях высоких температур. Также, помимо этого, строительная фибра имеет невысокую себестоимость и минимальный расход при изготовлении раствора бетона.

4. Одним из наиболее негативных факторов, влияющих на прочность шахтной крепи, являются воды, в составе которых имеются агрессивные элементы, в ходе эксперимента было выявлено, каким образом такие факторы влияют на прочность железобетона. Арматура в составе бетона за 4 ч была полностью разрушена, в образце остались лишь некоторые ее части, при этом прочность значительно упала. Такие условия могут привести к скорейшему износу шахтной крепи и последующему ее разрушению, что

может повлечь за собой дополнительные затраты. Особенно агрессивно себя проявляют воды, в составе которых имеются соли, буквально за считанные недели они могут разрушить металлическую конструкцию, тем самым нарушая поддержание массива горных пород.

5. Композитный материал на данный момент не используется при возведении шахтной крепи, поскольку поведение композитных материалов в условиях больших нагрузок и длительного воздействия горного давления изучено недостаточно, но при этом такой материал активно используется в строительстве зданий и сооружений на поверхности. Композит имеет наиболее низкую прочность по сравнению со стальной арматурой, но при этом более устойчив к агрессивным элементам подземной среды, раствор NaCl никаким образом не повлиял на изменение прочности образцов бетона, так как полимерные материалы, по сравнению со сталью, не подвержены коррозии. При этом полимерный материал также имеет наиболее низкую себестоимость.

Таким образом, поведение бетонных конструкций с изменением различных условий внешней среды, а также с добавлением различных компонентов для повышения прочности постоянно меняется. Любой добавляемый в состав бетона компонент имеет различные преимущества, ввиду этого требуются наиболее углубленные исследования по изучению негативного влияния на прочность бетонных конструкций в условиях агрессивной среды. Более детальное исследование поможет подобрать необходимый материал, который наилучшим образом сможет показать себя в тех или иных условиях. Полученные результаты могут способствовать наиболее корректному изучению прочностных характеристик бетона.

#### Список источников

1. Khalikova E.R., Demin V.F., Demina T.V., Syzdykbaeva D.S., Zairov Sh.Sh. Technological conditions for ensuring the stability of the array of enclosing rocks during the fastening of mine workings // Комплексное использование минерального сырья. 2024. № 3. С. 76–84. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.31>. EDN: RINFRY.
2. Ягодкин Ф.И., Плешко М.С. Повышение качества бетонной крепи вертикальных шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 11. С. 324–328. EDN: LTZNSN.
3. Перельгин И.В., Болотнев А.Ю. Исследование прочностных свойств бетонной шахтной крепи при растеплении массива горных пород // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2024. Т. 14. № 2. С. 334–337. EDN: EKVAZZ.
4. Старцев В.О. Влияние агрессивных жидкостей на свойства полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды Всесоюзного алюминиево-магниевого института. 2022. № 8. С. 98–112. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112>. EDN: QUEYUI.
5. Аузина Л.И. Системно-модельный анализ при оценке гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 90–101. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4232>. EDN: SRJQJA.



6. Li Jinghua, Li Guichen, Zhang Lei, Miao Kaijun, Wo Xiaofang, Yuan Yingqi, et al. Experimental study on stress-permeability evolution of rocks under complex mining-induced loading: Insights into water inrush risk in floor strata // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.12.007>. EDN: PWYMDQ.
7. Лавров С.А. Воздействие климатических изменений на сезонное протаивание и водный режим почвогрунтов зоны вечной мерзлоты // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2022. № 4. С. 66–85. [https://doi.org/10.35567/19994508\\_2022\\_4\\_5](https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_5). EDN: HKGQJU.
8. Бублик С.А., Семин М.А., Левин Л.Ю. Исследование прочности монолитной бетонной крепи шахтного ствола в условиях переменных тепловых нагрузок // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2021. Т. 14. № 2. С. 220–232. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.2.19>. EDN: DFCLCVG.
9. Huang Zhenjiang, Shen Mingxuan, Zhao Yu., Wang Chaolin., Bi Jing, Zhang Yongfa, et al. Experimental study on damage evolution and failure precursor characteristics of granite under thermal shock cycles // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.11.006>. EDN: PZJQIU.
10. Fattahi H., Jiryae F. Reliability analysis of surface settlement caused by mechanized tunneling-a case study // *Journal of Mining and Environment*. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 201–216. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11570.2143>. EDN: UNPJAN.
11. Баранова А.А., Гасс Ю.А., Лоншаков И.В. Определение масштабных и поправочных коэффициентов для образцов мелкозернистого бетона // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. Т. 9. № 3. С. 502–509. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-502-509>. EDN: XOFKOF.
12. Луценко Е.В. Автоматизированный системнокогнитивный анализ влияния состава бетона на его физико-механические свойства и стоимость // *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2023. № 191. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14701.56804>.
13. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // *Строительные материалы*. 2016. № 1–2. С. 96–103. EDN: VPWHMH.
14. Котляревская А.В., Лубенец Я.В., Котляревский А.А. Актуальность применения базальтовой фибры в современном строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 11. С. 507–516. EDN: RQIRTM.
15. Ведищев К.А., Полторан Я.Е. Экспериментальные Исследования фибробетонных конструкций // *Аллея науки*. 2017. Т. 4. № 15. С. 421–424. EDN: YMDUEH.
16. Ерошкина Н.А., Коровкин М.О., Чамурлиев М.Ю. Применение полипропиленовой микрофибры в технологии геоплимерного мелкозернистого бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2. С. 217. EDN: YATGRV.
17. Хорошев А.А., Есина Е.С., Нархова С.Е., Кононенко В.В. Влияние коррозии и методы защиты бетонных и железобетонных конструкций // *Инженерный вестник Дона*. 2025. № 3. С. 50–61. EDN: KQGQTY.
18. Перельгин И.В., Болотнев А.Ю. Влияние коррозии на железобетонные конструкции при ведении подземных горных работ // *Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета*. 2025. Т. 15. № 1. С. 153–157. EDN: VVDDPT.
19. Liu Gang, Zhu Xingyu, Yang Jiayong, Zhang Zhiqiang, Song Jilin, Yang Yuda. Study of structural deterioration behavior of mining method tunnels under steel reinforcement corrosion // *Buildings*. 2025. Vol. 15. Iss. 11. P. 1902. <https://doi.org/10.3390/buildings15111902>. EDN: QHUIFB.
20. Ahmad Z., Salmi A., El Ouni M.H., Ahmed M., Ahmed B., Ghazouani N. Experiments and modeling of structural behavior of different BFRP reinforcements in concrete compressive members // *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57. No. 6. P. 141. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02416-9>. EDN: QWOZGY.

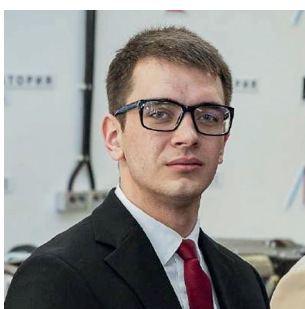
## References

1. Khalikova E.R., Demin V.F., Demina T.V., Syzdykbaeva D.S., Zairov Sh.Sh. Technological conditions for ensuring the stability of the array of enclosing rocks during the fastening of mine workings. *Complex Use of Mineral Resources*. 2024;3:76-84. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.31>. EDN: RINFRTY.
2. Yagodkin F.I., Pleshko M.S. Improving the quality of concrete walling for vertical mine shafts. *Mining informational and analytical bulletin*. 2009;11:324-328. (In Russ.). EDN: LTZNSN.
3. PereLygin I.V., Bolotnev A.Yu. Investigation of the strength properties of concrete shaft supports during the thawing of an array of rocks. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2024;14(2):334-337. (In Russ.). EDN: EKVAZZ.
4. Startsev V.O. Effect of aggressive liquids on properties of polymer composite materials (review). *Trudy Vsesoyuznogo alyuminievo-magnievogo instituta*. 2022;8:98-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-8-98-112>. EDN: QUEYUI.
5. Auzina L.I. System model analysis in estimating hydrogeological conditions of Eastern Siberia mineral deposits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024;335(1):90-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/1/4232>. EDN: SRJQJA.
6. Li Jinghua, Li Guichen, Zhang Lei, Miao Kaijun, Wo Xiaofang, Yuan Yingqi, et al. Experimental study on stress-permeability evolution of rocks under complex mining-induced loading: Insights into water inrush risk in floor strata. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.12.007>. EDN: PWYMDQ.
7. Lavrov S.A. The impact of climate change on seasonal thawing and water regime of soils in the permafrost zone. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022;4:66-85. (In Russ.). [https://doi.org/10.35567/19994508\\_2022\\_4\\_5](https://doi.org/10.35567/19994508_2022_4_5). EDN: HKGQJU.



8. Bublik S.A., Semin M.A., Levin L.Yu. Study of the strength of monolithic concrete lining of mine shaft under variable heat loads. *Computational Continuum Mechanics*. 2021;14(2):220-232. (In Russ.). <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.2.19>. EDN: DFCLCVG.
9. Huang Zhenjiang, Shen Mingxuan, Zhao Yu., Wang Chaolin., Bi Jing, Zhang Yongfa, et al. Experimental study on damage evolution and failure precursor characteristics of granite under thermal shock cycles. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2025.11.006>. EDN: PZJQIU.
10. Fattahi H., Jiryae F. Reliability analysis of surface settlement caused by mechanized tunneling-a case study. *Journal of Mining and Environment*. 2022;13(1):201-216. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.11570.2143>. EDN: UNPJAN.
11. Baranova A.A., Gass Yu.A., Lonshakov I.V. Determination of scale and correction factors for fine-grained concrete samples. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(3)502-509. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-502-509>. EDN: XOFKOF.
12. Lutsenko E.V. Automated system-cognitive analysis of the influence of concrete composition on its physical and mechanical properties and cost. *Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2023;191. (In Russ.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14701.56804>.
13. Kalashnikov V.A. Evolution of development of concretes compositions and change in concrete strength. Concretes of present and future. Part 1. Change in compositions and strength of concretes. *Construction materials Russia*. 2016;1-2:96-103. (In Russ.). EDN: VPWHMH.
14. Kotlyarevskaya A.V., Lubenets Y.V., Kotlyarevsky A.A. The relevance of the use of basalt fiber in modern construction. *Inženernyj vestnik Dona*. 2021;11:507-516. (In Russ.). EDN: RQIRTM.
15. Vedishchev K.A., Poltoran Ya.E. Experimental studies of fiber-reinforced concrete structures. *Alleya nauki*. 2017;4(15):421-424. (In Russ.). EDN: YMDUEH.
16. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Chamurliiev M.Ju. Application of polypropylene microfiber in technology of geopolymer fine grained concrete. *Inženernyj vestnik Dona*. 2018;2:217. (In Russ.). EDN: YATGRV.
17. Khoroshev A.A., Esina E.S., Narkhova S.E., Kononenko V.V. The effect of corrosion and methods of protection of concrete and reinforced concrete structures. *Inženernyj vestnik Dona*. 2025;3:50-61. (In Russ.). EDN: KQGQTY.
18. Pereygin I.V., Bolotnev A.Yu. Effect of corrosion on reinforced concrete structures during underground mining. *Molodezhnyj vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2025;15(1):153-157. (In Russ.). EDN: VVDDPT.
19. Liu Gang, Zhu Xingyu, Yang Jiayong, Zhang Zhiqiang, Song Jilin, Yang Yuda. Study of structural deterioration behavior of mining method tunnels under steel reinforcement corrosion. *Buildings*. 2025;15(11):1902. <https://doi.org/10.3390/buildings15111902>. EDN: QHUIFB.
20. Ahmad Z., Salmi A., El Ouni M.H., Ahmed M., Ahmed B., Ghazouani N. Experiments and modeling of structural behavior of different BFRP reinforcements in concrete compressive members. *Materials and Structures*. 2024;57(6):141. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02416-9>. EDN: QWOZGY.

#### Информация об авторах / Information about the authors

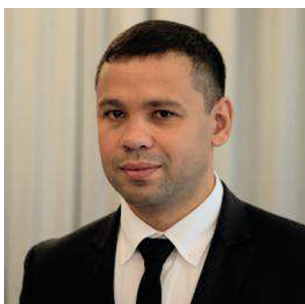


##### Перельгин Иван Викторович,

студент,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ [pereygin31102008@mail.ru](mailto:pereygin31102008@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-7246-9252>

##### Ivan V. Pereygin,

Student,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ [pereygin31102008@mail.ru](mailto:pereygin31102008@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-7246-9252>



##### Болотнев Александр Юрьевич,

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ [abolotnev@mail.ru](mailto:abolotnev@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0002-4250-6216>



**Aleksandr Yu. Bolotnev,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
abolotnev@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4250-6216>

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

И.В. Перельгин – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.  
А.Ю. Болотнев – разработка концепции, разработка методологии, научное руководство, курирование данных.  
Ivan V. Perelygin – investigation, writing – original draft, writing – editing.  
Aleksandr Yu. Bolotnev – conceptualization, methodology, supervision, data curation.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 03.02.2026; принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted 19.01.2026; approved after reviewing 03.02.2026; accepted for publication 16.02.2026.



Обзорная статья  
УДК 553.98:550.345  
EDN: LOKXJK  
DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-3



## Современные геохимические методы локального прогноза нефтегазоносности в арктических регионах Западной и Восточной Сибири: сравнительный анализ

И.О. Черемисин<sup>а</sup>, Е.В. Стукова<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация

<sup>б</sup>ООО «Производственно-геологическая компания «Сибгеоком»», рп. Маркова, Российская Федерация

**Резюме.** Работа посвящена исследованию и сравнительному анализу эффективности геохимических методов прогноза нефтегазоносности в арктических регионах Западной и Восточной Сибири. Рассматриваются особенности геологических условий, влияющие на выбор и реализацию методов разведки. Анализируется исторический опыт освоения нефтегазовых ресурсов региона, начиная с советского периода, и подчеркиваются достижения известных ученых, таких как В.П. Исаев и др. В работе подробно рассматриваются теоретические основы геохимического прогноза, включая теорию субвертикальной миграции углеводородов и принципы выявления геохимических аномалий. Описываются основные методы геохимических исследований, применяемых в Западной и Восточной Сибири. Особое внимание уделяется интегрированному подходу, сочетающему геохимические, геофизические и геологические данные. Приводятся примеры успешного применения геохимических методов, такие как выделение перспективных нефтегазоносных зон на Южно-Сюльдюкарском участке и подтверждение значительных ресурсов на Медвеьем месторождении. Даются рекомендации по совершенствованию методик прогноза, включая создание единого банка данных, автоматизацию обработки данных и внедрение новых технологий дистанционного зондирования. Подчеркивается необходимость международного сотрудничества и взаимодействия научных организаций с промышленными предприятиями для ускорения внедрения передовых технологий и устойчивого развития нефтегазовой отрасли России.

**Ключевые слова:** геохимические методы, локальный прогноз, нефтегазоносность, Арктика, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, интеграция методов, геолого-разведочные работы

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках темы № 1023110300018-4-1.5.4 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в молодежной лаборатории комплексных исследований Арктики Института земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия).

**Для цитирования:** Черемисин И.О., Стукова Е.В. Современные геохимические методы локального прогноза нефтегазоносности в арктических регионах Западной и Восточной Сибири: сравнительный анализ // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 30–45. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-3>. EDN: LOKXJK.

### Review article

## Modern geochemical methods for local oil and gas potential prediction in the Arctic regions of Western and Eastern Siberia: a comparative analysis

Ilya O. Cheremisin<sup>а</sup>, Elizaveta V. Stukova<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>б</sup>LLC "Production and Geological Company 'Sibgeocom'", Markova settlement, Russian Federation

**Abstract.** This work is devoted to the study and comparative analysis of the effectiveness of geochemical methods for predicting oil and gas potential in the Arctic regions of Western and Eastern Siberia. The features of geological conditions influencing the selection and implementation of exploration methods are considered. The analysis is given to the historical experience of developing oil and gas resources in the region, starting from the Soviet period and highlighting the achievements of renowned scientists such as V.P. Isaev and others. The work thoroughly examines the theoretical foundations of geochemical prediction including the theory of subvertical hydrocarbon migration and the identification principles of geochemical anomalies. The main geochemical research methods applied in Western and Eastern Siberia are described. Special attention is paid to an integrated approach combining geochemical, geophysical, and geological data. The article provides some examples of successful application of geochemical methods such as identification of promising oil and

© Черемисин И.О., Стукова Е.В., 2026



gas zones in the South-Syuldyukar area and confirming significant resources at the Medvezhye field. Recommendations are given for improving forecasting methods, including the creation of a unified database, automation of data processing, and introduction of new remote sensing technologies. The necessity of international cooperation and interaction between scientific organizations and industrial enterprises to accelerate the adoption of advanced technologies and ensure the sustainable development of Russia's oil and gas industry is emphasized.

**Keywords:** geochemical methods, local prediction, oil and gas potential, Arctic, Western Siberia, Eastern Siberia, integration of methods, geological exploration

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the topic No. 1023110300018-4-1.5.4 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation at the Youth Laboratory for Comprehensive Arctic Studies of the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia).

**For citation:** Cheremisin I.O., Stukova E.V. Modern geochemical methods for local oil and gas potential prediction in the Arctic regions of Western and Eastern Siberia: a comparative analysis. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):30-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-3>. EDN: LOKXJK.

## Введение

Разведка и освоение нефтегазовых ресурсов арктических регионов Западной и Восточной Сибири являются стратегическими задачами для российской экономики. Однако эти территории характеризуются экстремальными климатическими условиями и сложным геологическим строением, включающим многолетнемерзлые породы, мощную криолитозону и др. Данные факторы создают значительные препятствия для применения традиционных методов геологоразведки, таких как сейсморазведка, повышая их стоимость и снижая эффективность. В этих условиях наиболее перспективным направлением становятся геохимические методы поиска, обеспечивающие оперативное и относительно экономичное выявление признаков углеводородов непосредственно в зоне потенциально продуктивных слоев. Их значимость обусловлена возможностью прямого или косвенного обнаружения углеводородных флюидов. В то же время эффективная реализация этих методов в Арктике сталкивается с проблемами корректной интерпретации данных, вызванными уникальностью природной среды, которая может маскировать или исказить геохимические аномалии.

Цель представленного исследования – провести сравнительный анализ, систематизацию и оценку эффективности геохимических методов локального прогноза нефтегазоносности в арктических условиях Западной и Восточной Сибири. Основное внимание в работе уделяется детальному описанию как прямых (газо- и битуминологическая съемка, хромато-масс-спектрометрия), так и косвенных (изучение микроэлементов, изотопных составов) методов, их теоретическим основам, практической реализации и адаптации к специфическим региональным особенностям.

Для решения данных задач необходимо выявить особенности применения геохимических методов в Западной и Восточной Сибири, что в дальнейшем позволит оценить сильные стороны и ограничения геохимических методов, предложить рекомендации и улучшить процессы отбора образцов и обработки данных.

Нефтегазоносность Сибири издавна привлекает внимание исследователей. Хотя первые свидетельства о наличии углеводородов в регионе датируются серединой XIX в., систематическое изучение началось в советский период. Начало целенаправленному геологическому изучению арктических районов, в частности территории в низовьях реки Енисей, положила экспедиция Управления Главсевморпути 1934 г. под руководством Н.А. Гедройца, представителя классической школы Геологического комитета [1, 2]. Уже в 1934 г. геологами в районе устья реки Малая Хета были обнаружены приповерхностные выходы горючих газов. Несмотря на отсутствие прямых нефтепроявлений, Гедройц, опираясь на обнаруженные газопроявления, находки самородной серы и наличие соляных озер, дал положительную оценку перспективам низовьев Енисея [2, 3]. Эти результаты привлекли внимание к региону, и в 1935 г. была организована Усть-Енисейская нефтеразведочная экспедиция, работавшая до 1954 г. Первые промышленно значимые нефтепроявления были получены в 1942 г., когда на Малохетской структуре вскрыли газовую залежь [2, 4].

Значительный вклад в становление современной геологии региона внесли выдающиеся ученые. Так, Н.А. Гедройц не только занимался вопросами гидрогеологии и миграции углеводородов, но и первым научно обосновал необходимость поисков в Тазовском районе.



В 1942–1943 гг. он разработал программу работ, рассматривая север Западно-Сибирской низменности как зону сочленения структур Урала и Сибирской платформы. По его инициативе в 1943 г. была организована Тазовская геолого-поисковая партия под общим руководством М.Ф. Данилова, в состав которой вошли В.Н. Сакс и И.П. Лугинец [2, 4]. Таким образом, задолго до открытия в 1962 г. первого газового Тазовского месторождения, именно Н.А. Гедройц научно обосновал необходимость постановки здесь геолого-разведочных работ [2, 5].

Помимо полевых исследований, Гедройц сыграл ключевую роль в обобщении геологических материалов. В 1936 г. он составил одну из первых карт перспектив нефтеносности Арктического сектора Сибири, а в 1944–1945 гг. возглавлял Арктическую бригаду Всесоюзного нефтяного научно-исследовательского института по обобщению всех данных по нефтеносности Сибири [2, 3, 6]. Развивая свои прогнозы, он пришел к важным тектоническим выводам: в 1941 г. обосновал наличие в Усть-Енисейском районе двух систем складчатости – палеозойской (субширотной) и мезозойской (субмеридиональной, уходящей в сторону Гыданского полуострова). Эти идеи стали рабочей гипотезой для дальнейших поисков [2, 4].

Кульминацией геолого-разведочных работ 60–70-х гг. стало открытие целого ряда уникальных и крупных месторождений. В 1962 г. было открыто первое газовое Тазовское месторождение. За ним последовали Заполярное (1965), Уренгойское (1966), Медвежье (1967) и Ямбургское (1969). В Усть-Енисейском районе были открыты Мессояхское (1967), Соленинское (1969) и другие [1, 5, 7]. Одним из самых значимых событий стало открытие Ванкорской группы месторождений (1972–1991 гг.), проектирование геолого-разведочных работ для которой велось под руководством академика А.Э. Конторовича. Разработка комплекса методов прогноза нефтегазоносности способствовала открытию крупнейших месторождений [1, 7, 8].

С наступлением XXI в. развитие геохимии вышло на новый качественный уровень. Благодаря компьютерному моделированию, лазерной спектроскопии и высокоточной аналитической аппаратуре стало возможным переоценить перспективность ранее заброшен-

ных участков и выявить новые месторождения в сложнопостроенных регионах [9–12]. Накопленный к началу XXI в. огромный объем геолого-геофизической информации позволил перейти к решению принципиально новых задач: выявлению факторов, имевших решающее значение при формировании гигантских скоплений углеводородов, и пониманию процессов, приведших к образованию месторождений на периферии осадочного бассейна [11–13].

Современная наука использует инновационные технологии в сочетании с комплексным подходом, объединяющим геохимические и геофизические данные, что позволяет создавать высококачественные модели нефтяных и газовых объектов и значительно повышает точность прогноза запасов углеводородов [9–14].

### Материалы и методы исследования

В основе геохимических поисков месторождений углеводородов лежит концепция миграции флюидов из залежей, приводящая к формированию в приповерхностных средах ореолов рассеяния и аномальных геохимических полей (АГП) [15–17]. Теоретические основы современных представлений о миграции были заложены в трудах основоположников осадочно-миграционной теории – В.А. Соколова, Н.Б. Вассоевича и А.Э. Конторовича [1, 15, 18]. Формирование АГП обусловлено двумя основными механизмами [15, 16]:

1) диффузия – рассеяние газообразных углеводородов (C1–C5) в поровом пространстве пород под действием градиента концентраций [18, 19];

2) фильтрация – латеральный и вертикальный перенос флюидов по системам трещин и тектоническим нарушениям, играющий ключевую роль в формировании контрастных аномалий [16, 17, 20].

Совокупное действие этих процессов создает в почвах, подземных водах, горных породах и приземной атмосфере комплексные аномалии, которые могут служить индикаторами глубинных скоплений углеводородов<sup>1</sup> [17, 21, 22]. Однако прямая и однозначная интерпретация этих аномалий затруднена. Отсутствие выраженных углеводородных компонентов на

<sup>1</sup> Исаев В.П. Геохимические методы прогноза и поисков месторождений нефти и газа: учеб. пособ. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 196 с.



поверхности может быть не признаком отсутствия залежи, а, напротив, свидетельством наличия мощной и непроницаемой покрывки, надежно экранирующей флюиды. И наоборот, яркие поверхностные аномалии иногда связаны с разрушенными или незначительными скоплениями, либо с техногенными помехами [16, 19, 23]. Это фундаментальное ограничение определяет, что прямые методы, такие как газовая съемка, наиболее эффективны для решения задач регионального и зонального прогноза, тогда как для локального прогноза их данные требуют обязательной комплексной проверки и интеграции с другими методами [9, 21, 22]. В этой связи особый интерес представляет съемка по иловым газам водоемов и водотоков, интегрирующая информацию с площади и позволяющая нивелировать влияние локальных неоднородностей подстилающей поверхности [10, 24].

В зависимости от миграционной формы и среды-индикатора, в практических исследованиях выделяют несколько типов геохимических аномалий [15, 18]:

- газовые (углеводороды и неуглеводородные газы, такие как гелий, углекислый газ);
- битумные (битумоиды, микронепти);
- гидрогеохимические (изменения состава подземных вод);
- литохимические (вторичные изменения пород);
- биогеохимические (влияние углеводородов на растительность и микроорганизмы).

На формирование и сохранность аномалий влияет комплекс факторов:

- геологических (наличие разломов, свойства покрывки);
- физико-химических (рН, Eh);
- биогеохимических (активность микроорганизмов);
- климатических (условия мерзлоты, инфильтрация) [10, 16, 21].

В арктических условиях влияние этих факторов особенно выражено, что требует тщательной адаптации методик [9, 10, 11].

Особый практический интерес для арктических регионов представляет разработанная Г.Л. Корюкиным морфогенетическая классификация аномальных геохимических полей концентраций, выделяющая пять основных типов, связанных с различными геологическими структурами [25]:

- сводово-кольцевой – над антиклинальными структурами;
- линейно-приразломный – приуроченный к тектоническим нарушениям;
- мозаично-моноклиальный – контролируемый выклиниванием нефтегазоносных комплексов;
- сводовый – над куполами локальных поднятий;
- фумарольный – над субаквальные очагами разгрузки газов.

Данная классификация является эффективным инструментом не только для констатации факта миграции углеводородов, но и для определения генетической связи аномалий с конкретными типами ловушек, что принципиально важно для локального прогноза [23, 25].

*Развитие количественных методов оценки нефтегазоносности.* Параллельно с развитием полевых геохимических методов совершенствовались и подходы к количественной оценке генерационного потенциала недр. В этом отношении ключевую роль сыграли два взаимодополняющих метода: объемно-генетический и историко-генетический (бассейновое моделирование)<sup>2</sup> [21, 26, 27].

Объемно-генетический метод, основы которого были заложены еще А.Д. Архангельским (1927) и развиты в трудах В.А. Успенского, Н.Б. Вассоевича, А.Э. Конторовича и С.Г. Неручева, позволял оценить потенциальные ресурсы углеводородов на основе содержания органического вещества в нефтегазопроизводящих толщах [1, 21, 28]. Важнейшим вкладом стало учение о главной фазе (зоне) нефтеобразования (Н.Б. Вассоевич, А.Э. Конторович), показавшее неравномерность процессов генерации углеводородов в зависимости от стадий катагенеза [1, 15, 28].

Логическим развитием этих идей стал историко-генетический метод (бассейновое моделирование) [26, 27, 29]. Этот метод позволяет численно восстановить историю реализации генерационного потенциала во времени, с учетом всех этапов геологического развития осадочного бассейна: погружения, уплотнения пород, изменения теплового поля, генерации, миграции и аккумуляции углеводородов [16, 27, 29]. В основе современных программных продуктов (таких как Temis, Petromod), использующих этот метод, лежат кинетические модели преобразования керо-

<sup>2</sup> Прищепа О.М. Геология и геохимия нефти и газа: учеб.-метод. пособ. СПб.: Горный ун-т, 2023. 157 с.



гена, разработанные Б. Тиссо и Дж. Эспиталье, а также температурно-временной индекс Н.В. Лопатина [20, 23, 27].

Важно отметить, что даже современные историко-генетические методы имеют свои ограничения. К ним относятся: во-первых, закрытость кинетических моделей, не в полной мере отражающая реальные процессы в открытой системе; во-вторых, неоднозначность определения кинетических параметров (энергии активации и частотного фактора), известная как «компенсационный эффект»; в-третьих, высокая зависимость результатов от качества и полноты исходных геохимических данных, особенно по слабоизученным глубоким горизонтам [19, 23, 27]. Эти факторы необходимо учитывать при интерпретации результатов моделирования [9, 29].

*Современный комплекс методов.* Современный арсенал методов представляет собой комплексный подход, сочетающий полевые, лабораторные и математические способы исследования. Все применяемые методы подразделяются на три основные группы (табл. 1) [21, 22, 30–32].

Ключевое значение для успешного прогноза имеют стандартизация отбора проб, учет фоновых значений, исключение техногенных помех и комплексная интерпретация данных с привлечением геофизики [9, 21, 22].

*Методика и оценка эффективности для различных регионов.* Спецификой геологического строения Западной и Восточной Сибири объясняются сформировавшиеся различные подходы к комплексированию геохимических методов [7, 9, 11, 14].

*Критерии диагностики природы аномалий для локального прогноза.* Для перехода от региональной оценки к локальному прогнозу в арктических условиях необходим комплексный анализ аномалий по ряду диагностических критериев. Ключевыми из них являются:

1. Пространственная непрерывность аномалий по разрезу и их регистрация на разных уровнях поискового зондирования [16, 21, 25].

2. Расширенный спектр гомологов метана – наличие не только легких (C1–C2), но и тяжелых гомологов вплоть до пентана (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) [9, 18, 23].

3. Преобладание предельных углеводородов над непредельными, что указывает на термokatалитическую природу газа [17, 18, 26].

4. Закономерное увеличение содержаний тяжелых углеводородов вниз по разрезу [16, 23, 26].

5. Отсутствие корреляции между аномалиями углеводородов и составом органического вещества или литологическим типом пород, что подтверждает их миграционную, а не сингенетическую природу [17, 21, 28]. В сложнопостроенных разрезах Восточной Сибири, обогащенных углеродистым веществом, этот критерий позволяет отделить наложенные аномалии от сингенетических [13, 14, 33].

6. Повышенные содержания гелия и водорода как индикаторов глубинных, тектонически обусловленных путей миграции<sup>3</sup> [11, 34]. Гелий, в силу своей инертности и отсутствия связи с литологией, является наиболее надежным индикатором флюидопроводящих разломов, особенно в условиях мощного осадочного чехла [10, 24, 25].

7. Пространственное совпадение аномальных геохимических и геофизических полей. При этом важен не просто факт совпадения, а анализ структурной обусловленности геохимических полей [34]. Тяготение аномалий к кольцевым структурам, зонам разломов и другим элементам тектонического каркаса, выделяемым геофизическими методами, значительно повышает прогнозную значимость геохимических данных [9, 17, 20].

8. Наличие геохимической зональности. Для локального прогноза принципиально важ-

**Таблица 1. Группы методов**  
**Table 1. Groups of methods**

Группа методов	Пример
Прямые	Газовые съемки, битуминология, хромато-масс-спектрометрия
Косвенные	Изотопные, литохимические, гидрогеохимические, биогеохимические методы
Интеграционные	Статистическое моделирование (в т. ч. кластерный и дискриминантный анализ), комплексное зондирование, совместная интерпретация с геофизикой, бассейновое моделирование

<sup>3</sup> Пастухов Н.П. Взаимосвязь геохимических и геофизических полей в надпродуктивных комплексах нефтегазовых месторождений юга Сибирской платформы: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.13. М., 1992. 180 с.



ным является не только выявление аномалии, но и анализ ее внутреннего строения. Закономерное изменение состава углеводородных газов (например, увеличение доли тяжелых гомологов или закономерное изменение изотопного состава углерода метана) в направлении предполагаемого источника является надежным признаком его близости [9, 15, 17, 23, 26].

9. Адекватный выбор объекта опробования с учетом ландшафтно-геохимических условий. В арктических регионах, характеризующихся развитием криолитозоны и специфических биогеохимических барьеров (торфяники, моховые подушки), традиционное литогеохимическое опробование может быть дополнено или заменено биогеохимическими и гидрогеохимическими методами, что позволяет фиксировать слабоконтрастные, но устойчивые наложенные ореолы рассеяния [10, 24, 35].

Надежность локального прогноза многократно возрастает при выполнении данного комплекса критериев [9, 21].

### Результаты исследования и их обсуждение

Западная и Восточная Сибирь, являясь ключевыми нефтегазоносными провинциями России, характеризуются фундаментальными различиями в геологическом строении, что обуславливает необходимость применения различных методологических подходов к прогнозированию [7, 8, 14]. В основе методов лежит теория субвертикальной миграции углеводородов, направленная на выявление и интерпретацию геохимических аномалий над залежами [15, 16, 19].

Для эффективного прогнозирования в этих регионах требуются различные технологиче-

ские акценты, систематизированные в табл. 2 [9, 11, 14, 17, 34].

Рациональный комплекс методов прогнозирования в Западной и Восточной Сибири включает этапы, представленные в табл. 3 [9, 16, 21, 29].

*Оценка эффективности и обоснование рационального комплекса методов.* Эффективность геохимических методов прогноза в Западной и Восточной Сибири определяется не столько техническим оснащением, сколько синергетическим эффектом от интеграции данных [11, 29, 35]. Ключевые критерии успеха:

1. Стратифицированный выбор методов – соответствие методического аппарата региональным геологическим условиям [9, 14, 17]:

– для Западной Сибири: акцент на газовой хроматографии и биомаркерах [5, 36];

– для Восточной Сибири: приоритет изотопных исследований и анализа микроэлементов [33, 34].

2. Многоуровневая верификация – перекрестный контроль результатов [11, 16]:

– сопоставление геохимических аномалий с сейсмическими данными [9, 37];

– корреляция поверхностных проявлений с материалами структурного бурения [7];

– статистическая обработка разнородных данных (кластерный и дискриминантный анализы) [35].

3. Экономическая целесообразность – оптимизация затрат на поисковые работы [9, 11, 27]:

– снижение количества «сухих» скважин на 25–40 % [5, 8];

– сокращение сроков локализации перспективных объектов на 30 % [9, 10, 37];

– повышение точности прогнозных оценок до 85–90 % [11, 14, 29].

**Таблица 2. Сравнение технологий прогнозирования нефтегазоносности в Западной и Восточной Сибири**

**Table 2. Comparison of oil and gas potential forecasting technologies in Western and Eastern Siberia**

Технология	Западная Сибирь	Восточная Сибирь
Газовый и битуминологический каротаж	Важен для оценки качества продуктивных горизонтов	Необходим для изучения сложных геологических условий
Люминесцентно-битуминологический анализ	Диагностика остаточного наличия углеводородов	Используется для уточнения состава и сохранности углеводородов
Кластерный анализ	Эффективен для систематизации данных	Полезен при обработке большого объема разнородных данных
Дискриминантный анализ	Может использоваться для классификации признаков нефтегазоносности	Рекомендуется для проверки гипотез о механизмах образования залежей
Нейронные сети	Моделирование сложных процессов нефтегазообразования	Рекомендованы для анализа множества переменных и поиска связей



**Таблица 3. Этапы и стадии геохимических работ**  
**Table 3. Stages and phases of geochemical work**

Этап	Стадия	Основные задачи
Региональный	Прогноз нефтегазоносности	1. Изучение региональных геохимических аномалий. 2. Составление карт прогнозной нефтегазоносности. 3. Выделение зон вероятного скопления углеводородов
	Оценка зон нефтегазонакопления	1. Детальное исследование пространственного распространения углеводородов-трассеров. 2. Количественная оценка содержания легколетучих компонентов. 3. Разработка стратегии детальной оценки перспективных участков
Поисково-оценочный	Выявления объектов поискового бурения	1. Локализация залежей с использованием детальных газогеохимических съемок. 2. Поиск новых перспективных геохимических сигналов. 3. Выбор оптимальных точек для постановки поискового бурения
	Подготовки объектов к поисковому бурению	1. Углубленное изучение состава проб почвы, пород и вод. 2. Оценка рисков и вероятности успешной нефтегазоносности участка. 3. Оптимизация плана последующих этапов бурения
Разведочный	Разведки и пробной эксплуатации	1. Мониторинг изменений геохимических профилей. 2. Сбор данных о состоянии запасов углеводородов. 3. Подтверждение и перевод запасов в категорию разведанных

Рациональный комплекс методов формируется на основе принципа «последовательного фокусирования» [9, 16, 36]:

– региональный этап: выявление нефтегазоносных бассейнов [10, 11, 13];

– поисковый этап: оконтуривание перспективных зон [9, 14];

– детальный этап: локализация объектов для постановки поискового бурения [5, 7, 37].

Такой подход обеспечивает снижение совокупных рисков на 35–50 % по сравнению с традиционными методами прогнозирования, что подтверждается успешной апробацией на месторождениях Ванкорской группы в Западной Сибири и Чаяндинском в Восточной Сибири [5, 8, 13, 14].

Таким образом, максимальная эффективность достигается не простым суммированием методов, а их системной интеграцией в рамках единой прогнозной модели, адаптированной к специфике каждого региона [9, 16, 29].

*Результаты исследований комплексом геохимических и геофизических методов в арктических районах.* В Западной Сибири исследования проводились на территории Медвежьего лицензионного участка (ЛУ), который находится в Надымском районе Ямало-Ненецкого автономного округа. Площадь участка вытянута в меридиональном направлении на 120 км при ширине 25–35 км [5], с целью оперативной оценки нефтегазоносности поиско-

вых объектов в отложениях неокома и средней юры, выявленных сейсморазведкой, а также апробации методов в условиях мощной многолетней мерзлоты [9, 10]. Основные задачи включали:

– выделение интервалов повышенной газонасыщенности [9, 33];

– изучение состава и природы углеводородных газов [10, 18];

– оценку перспективности объектов и интеграцию данных с результатами геофизических исследований скважин (ГИС) [20, 21, 37].

Для эффективного прогнозирования нефтегазоносности в арктических условиях был разработан специализированный комплекс геохимических методов, адаптированный к сложным геолого-климатическим особенностям региона [9, 11, 29]. Комплекс включает три основные группы методов, каждая из которых решает специфические геологические задачи [29, 34].

Газогеохимические методы (термовакuumная дегазация кернa, газовый каротаж промысловой жидкости, анализ иловых и почвенных газов) позволяют определять концентрации метана, его гомологов ( $C_2-C_6$ ), углекислый газ, водород, гелий, а также рассчитывать коэффициенты сухости ( $C_1/\Sigma C_2^+$ ) и  $i-C_4/n-C_4$  [9, 10]. Эти параметры используются для выявления интервалов повышенной газонасыщенности, оценки фазового состояния флюидов и иден-



тификации зон вертикальной миграции углеводородов [16, 17, 19].

Изотопно-геохимические методы (изотопный анализ углерода метана  $\delta^{13}\text{C}$ , биомаркерная диагностика, определение степени катагенеза  $R_o$ ) обеспечивают установление генезиса углеводородов, выявление взаимосвязи нефтей и рассеянных битумоидов, а также оценку зрелости органического вещества [18, 21, 26].

Интеграционные и моделирующие методы (3D геохимическое моделирование, совместная интерпретация с данными ГИС и сейсморазведки, статистический анализ) позволяют осуществлять стратиграфическую привязку аномалий к целевым горизонтам, прогнозировать коллекторские свойства и зоны насыщения, оптимизировать расположение поисковых и разведочных скважин [9, 27, 29].

Реализация методического комплекса осуществляется поэтапно в процессе геолого-разведочных работ (ГРП). На региональном этапе применяются люминесцентно-битуминологическая съемка масштаба 1:200000, газовый каротаж и изотопный анализ пластовых флюидов, что позволяет создать прогнозно-геохимические карты и установить региональные газогеохимические зоны [9, 22].

На поисковом этапе используются детальная газогеохимическая съемка масштаба 1:50000, хромато-масс-спектрометрический анализ биомаркеров и микробиологические исследования, что обеспечивает выявление локальных аномальных геохимических зон и повышение достоверности прогноза на 30–40 % [9, 10].

На разведочном этапе применяются 3D геохимическое моделирование продуктивных толщ, мониторинг изменения состава углеводородов при бурении и интеграция с данными ГИС и сейсморазведки, что позволяет выделять интервалы для испытания, прогнозировать фазовое состояние флюидов и снижать риски ГРП на 25 % [9, 27, 37].

В разрезе скважины № 50 выявлена классическая зональность распределения углеводородных газов с увеличением концентраций и преобладания предельных углеводородов над непредельными с глубиной, особенно в отложениях тангаловской свиты (неоком). По комплексу данных (газометрия + ГИС) выделено 9 интервалов повышенной газонасыщенности. Наиболее перспективными признаны пласты БН2, БН4, БН7, БН8 и БН9 [5, 37].

Изотопный анализ углерода метана ( $\delta^{13}\text{C}$  от -40,09 до -38,91 ‰) для тангаловской свиты указал на его термokatалитическую природу. На Медвежьем месторождении изотопно-геохимический анализ выявил различный генезис углеводородов: для верхних интервалов установлен биогенный генезис газа ( $\delta^{13}\text{C}$  от -65 до -70 ‰), а для нижних горизонтов – смешанное термогенно-биогенное происхождение ( $\delta^{13}\text{C}$  от -45 до -55 ‰) [5, 26].

Многоуровневая газогеохимическая съемка установила четкую стратиграфическую дифференциацию сенонских отложений. Верхняя часть разреза характеризуется фоновыми концентрациями углеводородов (0,0001–0,001 %), тогда как в нижней части зафиксированы аномальные содержания (0,01–0,1 %). Биомаркерная диагностика подтвердила автохтонное происхождение рассеянных битумоидов и низкую степень катагенеза органического вещества ( $R_o = 0,3–0,5$  %) [5, 18, 22].

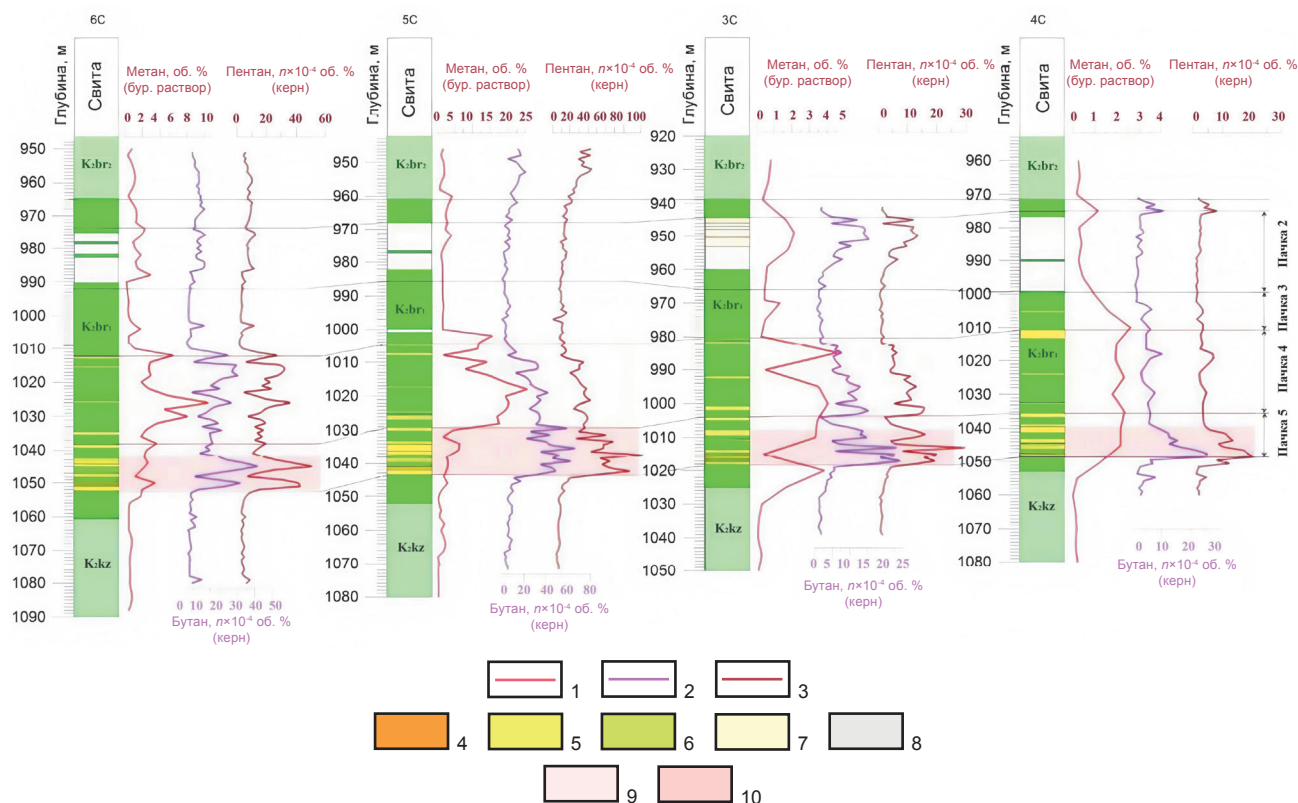
На рис. 1 представлено сопоставление интервалов повышенной газонасыщенности пород в разрезе скважин 6С, 5С, 3С и 4С на Медвежьем нефтегазоконденсатном месторождении [22, 34].

Внедрение предложенного комплекса геохимических методов позволило:

- повысить достоверность прогноза продуктивных интервалов на 30–40 % за счет комплексного подхода (геохимия + ГИС);
- снизить риски геолого-разведочных работ на 25 % путем ранжирования объектов на основе геохимических критериев;
- получить принципиально новые данные о газогеохимической зональности разреза и природе углеводородов;
- оптимизировать расположение скважин на основе комплексной интерпретации данных.

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность разработанного комплекса геохимических методов для поисков и разведки месторождений в арктических условиях Западной Сибири. Для испытания рекомендованы конкретные интервалы в пластах БН2, БН4, БН5, БН7, БН8 и БН9. Наиболее вероятные скопления углеводородов прогнозируются в интервалах БН2, БН4\_1, БН8\_1 и БН8\_2 [36].

Рекомендуется широкое внедрение этих методов в практику геолого-разведочных работ, включая:



**Рис. 1. Сопоставление интервалов повышенной газонасыщенности и пачек пород в разрезе скважин 6С, 5С, 3С и 4С (пилотный ствол) на Медвежьем нефтегазоконденсатном месторождении:**

1–3 – кривые концентрации углеводородных компонентов: 1 – метан (буровой раствор), 2 – бутан (керна), 3 – пентан (керна); 4–8 – классы пород: 4 – с наилучшими коллекторскими свойствами, 5 – с хорошими коллекторскими свойствами, 6 – с ухудшенными коллекторскими свойствами, 7 – опоки с хорошими коллекторскими свойствами, 8 – опоки с низкими коллекторскими свойствами; 9–10 – интервалы повышенных концентраций углеводородов: 9 – интервал 1, 10 – интервал 2

**Fig. 1. Comparison of intervals of increased gas saturation and rock units in the section of wells 6C, 5C, 3C and 4C (pilot borehole) at the Medvezhye oil and gas condensate field:**

1–3 – hydrocarbon component concentration curves: 1 – methane (drilling mud), 2 – butane (core), 3 – pentane (core); 4–8 – rock classes: 4 – best reservoir properties, 5 – good reservoir properties, 6 – poor reservoir properties, 7 – flasks with good reservoir properties, 8 – flasks with poor reservoir properties; 9–10 – intervals of elevated hydrocarbon concentrations: 9 – interval 1, 10 – interval 2

– обязательное проведение газометрического мониторинга при бурении всех поисково-разведочных скважин;

– использование изотопно-геохимических методов для установления генезиса углеводородов;

– внедрение 3D геохимического моделирования на всех этапах ГРП;

– создание интегрированных баз данных, объединяющих геохимическую и геофизическую информацию.

Предложенный комплекс методов позволяет существенно повысить эффективность и снизить затраты геолого-разведочных работ в арктических условиях Западной Сибири [5, 9, 11].

В Восточной Сибири был рассмотрен Южно-Сюльдюкарский ЛУ, расположенный в Мирнинском районе республики Саха (Якутия), северо-западнее г. Ленска и западнее г. Мирный. Участок охватывает площадь 2450 км<sup>2</sup>, он включен в региональные зоны нефтегазонакопления Непско-Ботуобинской антеклизы, охватывая Мирнинское и Сюльдюкарское поднятия [13, 14, 33].

Методологической основой работ является концепция вертикальной миграции углеводородных флюидов из залежей, приводящая к формированию в приповерхностных средах ореолов рассеяния и АГП [16, 17, 29]. Для выявления низкоконтрастных аномалий в слож-



ных геологических условиях был разработан комплексный подход, основанный на взаимодополняющих методах прямых поисков углеводородов [14, 29, 33, 34].

Полевые работы включали два основных направления: лито-газгеохимическое опробование и гидрогазгеохимическую съемку [24, 35].

Целью опробования было выявление аномальных полей сорбированных и свободных углеводородных газов, гелия и водорода, связанных с диффузионными и фильтрационными потоками из глубинных залежей [17]. Работы проводились по сети сейсмических профилей с шагом 0,5–1 км. Бурение неглубоких скважин (1–2 м) выполнялось с позиционированием GPS. Ключевым элементом методики являлась термовакуумная дегазация проб шлама непосредственно в полевых условиях, что позволило исключить окисление углеводородов и потери легких компонентов. Отбор проб свободного газа осуществлялся с помощью вакуумного пробоотборника ВГЗ-01 [13, 14, 33].

Для выявления зон разгрузки глубинных флюидов проводилось опробование поверхностных вод в зимний период. Анализировался полный комплекс показателей: органолептические свойства, физико-химические параметры (Eh, pH, электропроводность), ионно-солевой состав и растворенные газы (углеводороды, гелий) [10, 24].

Лабораторные исследования выполнялись на газовом хроматографе с диапазоном определяемых концентраций  $10^{-7}$ – $10^{-12}$  % об. Определялся широкий спектр компонентов: углеводородные газы ( $C_1$ – $C_6$ ), ароматические углеводороды (бензол) и неуглеводородные газы (водород, гелий, углекислый газ) [9, 10, 18].

Для обработки данных применялся комплекс современных подходов:

1. Статистический анализ – корреляционный и кластерный анализы для выявления ассоциаций геохимических показателей и оценки степени перспективности аномальных геохимических зон (АГЗ) относительно эталонного Сьюльдюкарского месторождения [13, 14, 35].

2. Геохимическое моделирование – аналитическое продолжение полей концентраций углеводородов и гелия на уровень продуктивных горизонтов (венд-нижнекембрийский комплекс) с использованием авторских программных комплексов («Геопрогноз») на основе мо-

дели диффузионного массопереноса (закон Фика) [16, 17, 29].

3. Картирование тектонических нарушений – в качестве основного индикатора флюидопроводных зон использовалось аномальное содержание гелия (превышение фона в два раза и более) [10, 25, 34].

4. Прогноз фазового насыщения – определение типа флюида (нефть, газ, газоконденсат) проводилось на основе системы геохимических коэффициентов, включая коэффициент сухости газа ( $CH_4/C_{2+}$ ), бутановый ( $iC_4/nC_4$ ) и пентановый ( $iC_5/nC_5$ ) коэффициенты, а также анализ «краевых эффектов» [17].

На рис. 2 представлено распределение геохимических показателей вдоль сейсмопрофилей Южно-Сюльдюкарского ЛУ [13, 14, 34].

В результате проведенных работ на территории Южно-Сюльдюкарского ЛУ было выявлено и оконтурено несколько комплексных АГЗ. Эти зоны характеризуются устойчивыми аномалиями не только по метану, но и по его гомологам ( $C_2$ – $C_6$ ), гелия и водорода, что указывает на их «эпигенетическую», миграционную природу и связь с глубинными источниками [13, 33, 34].

На основе расчетов геохимических коэффициентов выполнена оценка фазового состояния флюидов в прогнозируемых залежах. Для различных АГЗ установлено:

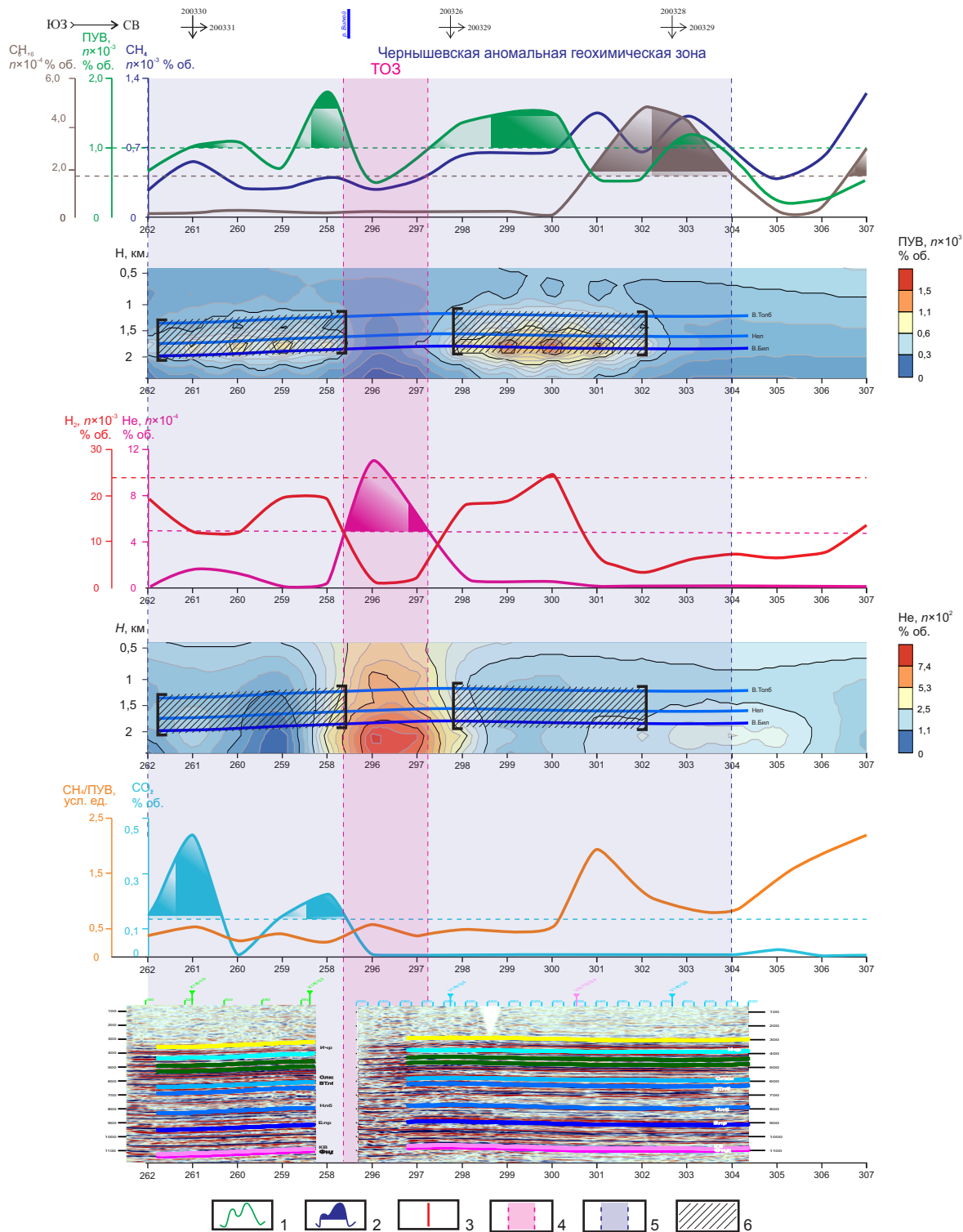
1. Нефтяное насыщение – характеризуется низкими значениями коэффициента сухости (менее 5) и бутанового коэффициента (менее 0,4).

2. Газоконденсатное насыщение – бутановый коэффициент в диапазоне 0,4–0,8.

3. Газовое насыщение – высокий коэффициент сухости (более 9–10) и бутановый коэффициент (более 0,8).

Построена карта тектонических нарушений, которая показала, что большинство выявленных АГЗ тяготеют к зонам повышенной трещиноватости и разломам, являющимся проводящими каналами для миграции углеводородных флюидов. Это подтверждается их корреляцией с аномалиями гелия (см. рис. 2) [10, 24, 34].

Переобработка архивных материалов газового каротажа девяти глубоких скважин позволила построить геолого-геохимические разрезы и подтвердить повышенную газонасыщенность подсолевых венд-нижнекембрийских отложений в пределах выделенных зон. Глубинное сейсмогеохимическое моделирование обеспечило стратиграфическую при-



**Рис. 2. Распределение геохимических показателей вдоль сейсмопрофилей Южно-Сюльдюкарского лицензионного участка:**

- 1 – графики геохимических показателей; 2 – графики геохимических аномалий;
- 3 – тектонические нарушения; 4 – тектонически ослабленная зона (выделена по содержанию гелия);
- 5 – аномальная геохимическая зона;
- 6 – зоны распространения нефтегазонасыщенных коллекторов

**Fig. 2. Distribution of geochemical indicators along seismic profiles of the South-Syuldyukar license area:**

- 1 – plots of geochemical indicators; 2 – plots of geochemical anomalies;
- 3 – tectonic faults; 4 – tectonically weakened zone (identified by helium content); 5 – anomalous geochemical zone;
- 6 – zones of distribution of oil- and gas-saturated reservoirs



вязку приповерхностных аномалий к целевым продуктивным горизонтам (Осинский, Ботубинский, Улаханский) [14, 29, 34].

Таким образом, разработанный и апробированный на Южно-Сюльдюкарском ЛУ комплекс геолого-геохимических методов доказал свою высокую эффективность для решения задач поисковой геологии в арктических регионах Восточной Сибири. Интеграция современных геохимических методов с традиционной геофизикой является мощным инструментом для прямой оценки нефтегазоносности и оптимизации геолого-разведочных работ в сложно построенных и труднодоступных регионах [9, 11, 14].

### Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность геохимических методов локального прогноза нефтегазоносности в арктических регионах Западной и Восточной Сибири, несмотря на существенные различия в их геологическом строении. Сравнительный анализ выявил региональную специфику, требующую дифференцированного подхода к выбору и применению методов.

В условиях Западной Сибири с ее относительно простым строением осадочного чехла наибольшую эффективность показали традиционные газогеохимические и битуминологические методы в комплексе с современной хромато-масс-спектрометрией. На примере Медвежьего месторождения доказана возможность повышения достоверности прогноза на 30–40 % и снижения рисков ГРП на 25 % за счет интеграции геохимических данных с результатами сейсморазведки и ГИС.

Для Восточной Сибири, характеризующейся сложной тектоникой и глубокой эрозивной расчлененностью, разработан специализированный комплекс методов с акцентом на анализе редких газов (гелий), микроэлементов-индикаторов и изотопных систем. Апробация методики на Южно-Сюльдюкарском лицензионном участке позволила не только выявить перспективные аномальные зоны, но и осуществить прогноз фазового

состояния флюидов с определением нефтяных, газоконденсатных и газовых насыщений.

Ключевыми факторами успешного применения геохимических методов в арктических условиях являются:

– адаптация методик к специфике многолетнемерзлых пород и сложных тектонических структур;

– комплексное использование прямых и косвенных методов поиска;

– интеграция геохимических данных с геофизической и геологической информацией;

– применение современных методов тематического моделирования, статистического анализа, цифровых технологий и искусственного интеллекта;

– учет специфики формирования геохимических полей концентраций в Арктике, в том числе таких явлений, как квазистационарные «тепловые окна» – зоны разгрузки глубинных флюидов, фиксируемые в водной толще.

Перспективы развития геохимических методов прогноза нефтегазоносности в арктических регионах связаны с созданием единого банка геохимических данных, внедрением технологий автоматизированной обработки информации, разработкой новых высокочувствительных аналитических методик и расширением применения дистанционного зондирования. Особое значение приобретает международное сотрудничество и тесное взаимодействие научных организаций с промышленными предприятиями для ускоренного внедрения передовых технологий в практику геолого-разведочных работ.

Таким образом, рационально подобранный и адаптированный к региональным условиям комплекс геохимических методов представляет собой эффективный инструмент для решения стратегических задач освоения нефтегазового потенциала арктических регионов России, обеспечивающий существенное повышение экономической эффективности и снижение рисков на всех этапах геолого-разведочного процесса.

### Список источников

1. Конторович А.Э., Фрадкин Г.С. Из истории отечественной геологии нефти и газа: сб. ст. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. Вып. 1. 198 с.
2. Евдошенко Ю.В. Геолог Н.А. Гедройц и его оценки перспектив нефтеносности Севера Западной Сибири // Северный регион: наука, образование, культура. 2022. № 4. С. 6–17. <https://doi.org/10.34822/2312-377X-2022-4-6-17>. EDN: PZMGVD.



3. Гедройц Н.А. Перспективы нефтеносности Севера Сибири: основные итоги работы по обобщению материалов нефтеносности // Недра Арктики. 1946. № 1. С. 9–14.
4. Сакс В.Н. Геологические исследования в северо-восточной части Западно-Сибирской низменности // Труды Горно-геологического управления Главсевморпути. М.; Л.: Главсевморпути, 1946. Вып. 22. 76 с.
5. Ахмедсафин С.К., Рыбальченко В.В., Рыбьяков А.Н., Шарафутдинов Р.Ф., Смирнов А.С., Нежданов А.А. [и др.]. Новая жизнь Медвежьего. 50 лет с начала разработки первого газового гиганта Западной Сибири // Газовая промышленность. 2017. № S2. С. 58–68. EDN: GAUIIN.
6. Гедройц Н.А. Нефтеносность советской Арктики по данным на 1949 год. Районирование по перспективам нефтеносности // Труды НИИ геологии Арктики Главсевморпути при Совете Министров СССР. М.; Л.: Главсевморпути, 1950. 70 с.
7. Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 11-12. С. 1832–1845. EDN: USJNNL.
8. Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г. Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра, 1975. 680 с.
9. Zavatsky M.D., Veduta O.V., Naumenko V.O. Prospecting terrain for surface geo-chemical exploration of oil and gas in West Siberia // *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2024. Vol. 8. Iss. 2. P. 276–286. <https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2132007>.
10. Dultsev F.F., Chernykh A.V. Geochemistry of Water-dissolved gases of oil-and-gas bearing deposits in Northern and Arctic regions of Western Siberia // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 459. Iss. 4. P. 042024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042024>. EDN: IINAYB.
11. Мельников П.Н., Соловьев А.В., Скворцов М.Б., Грушевская О.В., Уварова И.В., Кравченко М.Н. [и др.]. Основные результаты геолого-разведочных работ на углеводородное сырье в Арктической зоне Российской Федерации в 2020–2022 гг. и перспективы ее дальнейшего освоения // *Геология нефти и газа*. 2024. № 3. С. 5–18. <https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-3-5-18>. EDN: FMWVWV.
12. Лобусев М.А., Лобусев А.В., Бочкарев А.В., Антипова Ю.А. Генетические причины доминирующей газоносности юрско меловых отложений арктического сектора Западно-Сибирской нефтегазоносной мегапровинции // *Территория Нефтегаз*. 2020. № 1. С. 44–55.
13. Копылов И.С. Анализ геохимических полей на западе Сибирской платформы и прогнозирование зон нефтегазоаккумуляции // *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении*. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2025. № 28. С. 87–95. <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2025.87>. EDN: PPJANC.
14. Битнер А.К., Поздняков В.А. Новые технологии геологической разведки. Месторождения углеводородов Сибирской платформы и прилегающих территорий: монография. Красноярск: СФУ, 2017. 324 с.
15. Петухов А.В., Старобинец И.С., Зубайраев С.Л. [и др.]. Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений. М.: Недра, 1993. 287 с.
16. Петухов А.В. Геолого-геохимическая модель нефтегазовой залежи // *Геология нефти и газа*. 1990. № 5. С. 10–15.
17. Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Самсонов В.В., Сурков В.С., Трофимук А.А. Достижения геологии нефти и газа в Сибири за 60 лет советской власти // *Геология и геофизика*. 1977. Т. 18. № 11. С. 30–39. EDN: QMWUSX.
18. Соколов В.А. Геохимия природных газов. М.: Недра, 1971. 334 с.
19. Saunders D.F., Burson K.R., Thompson C.K. Model for hydrocarbon micro seepage and related near-surface alterations // *AAPG Bulletin*. 1999. Vol. 83. Iss. 1. P. 170–185.
20. Карцев А.А. Основы геохимии нефти и газа. М.: Недра, 1969. 272 с.
21. Барташевич О.В., Зорькин Л.М., Петухов А.В. и др. Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений. М.: Недра, 1980. 300 с.
22. Гончаров И.В. Геохимия нефтей Западной Сибири. М.: Недра, 1987. 181 с.
23. Klusman R.W. Rate of vertical migration of light hydrocarbons from oil and gas accumulations // *AAPG Bulletin*. 2021. Vol. 105. Iss. 4. P. 789–808.
24. Yurkevich N.V., Saeva O., Yurkevich N.V., Kolesnikov R., Kuleshova T. Hydrochemical characteristic of the arctic thermoclast lakes (Gydan Peninsula, Russian) // *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM 2020*. 2020. Vol. 5.1. P. 423–430. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.054>.
25. Корюкин Г.Л. Критерии прогнозной оценки нефтегазоносности арктических акваторий по данным геохимических исследований // *Геология нефти и газа*. 2003. № 4. С. 36–42.
26. Старобинец И.С. Геолого-геохимические особенности газоконденсатов. Л.: Недра, 1974. 151 с.
27. Прищепа О.М. Проблемы воспроизводства запасов углеводородов: арктический шельф и (или) трудноизвлекаемые запасы // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2016. № 1-2. С. 18–34. EDN: VZYNDL.
28. Ларская Е.С. Использование геохимии органического вещества для нефтегазопоисковых целей // *Геология нефти и газа*. 1990. № 10. С. 20–24.
29. Бурштейн Л.М. Методология комплексного подхода к определению возраста интрузивных образований Восточной Сибири. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2001. 280 с.
30. Abrams M.A. Evaluation of near-surface gases in marine sediments to assess subsurface petroleum gas generation and entrapment // *Geosciences*. 2017. Vol. 7. Iss. 2. P. 35. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020035>. EDN: YGHHYF.



31. Алексеев Ф.А., Гужевский В.А. Основы литогеохимических поисков нефти и газа. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.
32. Алукер Э.Д., Кучерук Е.В., Петухов А.В. Геохимические методы поисков нефти и газа в СССР и за рубежом // Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ РАН, 1989. Т. 16. С. 177–178.
33. Калинин А.И. Перспективы нефтегазоносности северо-восточной части Алданской антеклизы // Нефтяное хозяйство. 2019. № 6. С. 22–27. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-6-22-27>. EDN: GXRFFY.
34. Дмитриевский А.Н. Фундаментальные проблемы геологии нефти и газа // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2004. № 12. С. 4–7. EDN: HRYUAV.
35. Андреева Н.Н., Борковский А.А., Верес С.П., Соколов А.В., Хмелевский М.С. Перспективы применения прямых геохимических методов поисков залежей нефти и газа относительно небольших размеров в Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2001. № 4. С. 53–57. EDN: VVZCGO.
36. Пунанова С.А. Углеводородные системы и комбинированные ловушки нижнесреднеюрских отложений северных регионов Западной Сибири // Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 3. С. 22–27. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2021-3-22-27>. EDN: QZBTVT.
37. Shuster V.L. Prospects for exploration and development of large oil and gas fields in mega-reservoirs of the northern part of the West Siberian oil and gas province // Current Problems of Oil and Gas. 2022. Iss. 4. <https://doi.org/10.29222/tpng.2078-5712.2022-39.art6>.

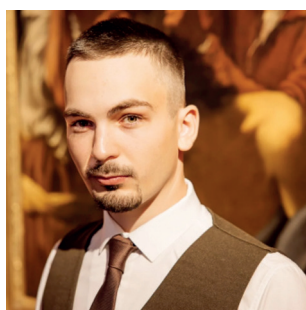
### References

1. Kontorovich A.E., Fradkin G.S. *From the history of Russian geology of oil and gas*. Collection of articles. Novosibirsk: Scientific Publishing Center of the Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; 1998, Iss. 1, 198 p. (In Russ.).
2. Evdoshenko Yu.V. Geologist N. A. Geologist Nikolai Gedroits and his assessment of oil potential of the North of west Siberia. *Severnyy region: nauka, obrazovanie, kultura*. 2022;4:6-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.34822/2312-377X-2022-4-6-17>. EDN: PZMGVD.
3. Geidroits N.A. Prospects for oil-bearing capacity of Northern Siberia: main results of the work on summarizing of oil-bearing materials. *Nedra Arktiki*. 1946;1:9-14. (In Russ.).
4. Saks V.N. Geological studies in the north-eastern part of the West Siberian Lowland. In: *Trudy Gorno-geologicheskogo upravleniya Glavsevmorputi*. Moscow; Leningrad: Glavsevmorputi; 1946, Iss. 22, 76 p. (In Russ.).
5. Akhmedsafin S.K., Rybalchenko V.V., Rybiakov A.N., Sharafutdinov R.F., Smirnov A.S., Nezhdanov A.A., et al. The new life of Medvezhye. 50 years to the day when the first West-Siberian gas giant's development started. *Gas Industry Journal*. 2017;S2:58-68. (In Russ.). EDN: GAUIIN.
6. Geidroits N.A. Oil potential of the Soviet Arctic according to 1949 data. Zoning by oil potential prospects In: *Proceedings of the Research Institute of Arctic Geology of the Main Directorate of the Northern Sea Route under the Council of Ministers of the USSR*. Moscow; Leningrad: Glavsevmorput; 1950, 70 p. (In Russ.).
7. Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I. Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic. *Russian Geology and Geophysics*. 2001;42(11-12):1832-1845. (In Russ.). EDN: USJNNL.
8. Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Salmanov F.K., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Ervye Yu.G. *Geology of oil and gas of Western Siberia*. Moscow: Nedra; 1975, 680 p. (In Russ.).
9. Zavatsky M.D., Veduta O.V., Naumenko V.O. Prospecting terrain for surface geo-chemical exploration of oil and gas in West Siberia. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2024;8(2):276-286. <https://doi.org/10.1080/24749508.2022.2132007>.
10. Dultsev F.F., Chernykh A.V. Geochemistry of water-dissolved gases of oil-and-gas bearing deposits in Northern and Arctic regions of Western Siberia. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;459(4):042024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042024>. EDN: IINAYB.
11. Mel'nikov P.N., Solov'ev A.V., Skvortsov M.B., Grushevskaya O.V., Uvarova I.V., Kravchenko M.N., et al. Main results of geological exploration for hydrocarbons in the Arctic zone of the Russian Federation in 2020-2022 and prospects for its further development. *Geology of Oil and Gas*. 2024;3:5-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.47148/0016-7894-2024-3-5-18>. EDN: FMWOVW.
12. Lobusev M.A., Lobusev A.V., Bochkarev A.V., Antipova Yu.A. Genetic reasons for the dominant gas content of the Jurassic Cretaceous deposits of the Arctic Area of the West Siberian oil and gas megaprovince. *Oil and Gas territory*. 2020;1:44-55. (In Russ.).
13. Kopylov I.S. Analysis of geochemical fields in the west of the Siberian Platform and forecasting oil and gas accumulation zones. *Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky*. 2025;28:87-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/chirvinsky.2025.87>. EDN: PPJANC.
14. Bitner A.K., Pozdnyakov V.A. *New technologies of geological exploration. Hydrocarbon deposits of the Siberian platform and adjacent territories*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2017, 324 p. (In Russ.).
15. Petukhov A.V., Starobinets I.S., Zubajraev S.L., et al. *Fundamentals of the theory of geochemical fields of hydrocarbon accumulations*. Moscow: Nedra; 1993, 287 p. (In Russ.).
16. Petukhov A.V. Geological-geochemical model of an oil and gas deposit. *Russian oil and gas geology*. 1990;5:10-15. (In Russ.).



17. Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Salmanov F.K., Samsonov V.V., Surkov V.S., Trofimuk A.A. Progress in petroleum and gas exploration science in Siberia in 60 year period of the soviet administration. *Russian Geology and Geophysics*. 1977;18(11):30-39. EDN: QMWUSX.
18. Sokolov V.A. *Geochemistry of natural gases*. Moscow: Nedra; 1971, 334 p. (In Russ.).
19. Saunders D.F., Burson K.R., Thompson C.K. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bulletin*. 199;83(1):170-185. (In Russ.).
20. Kartsev A.A. *Fundamentals of oil and gas geochemistry*. Moscow: Nedra; 1969, 272 p. (In Russ.).
21. Bartashevich O.V., Zorkin L.M., Petukhov A.V. et al. *Geochemical methods for oil and gas field prospecting*. Moscow: Nedra; 1980, 300 p. (In Russ.).
22. Goncharov I.V. *Geochemistry of Western Siberian oils*. Moscow: Nedra; 1987, 181 p. (In Russ.).
23. Klusman R.W. Rate of vertical migration of light hydrocarbons from oil and gas accumulations. *AAPG Bulletin*. 2021;105(4):789-808.
24. Yurkevich N.V., Saeva O., Yurkevich N.V., Kolesnikov R., Kuleshova T. Hydrochemical characteristic of the Arctic thermocarst lakes (Gydan Peninsula, Russian). In: *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM 2020*. 2020;5.1:423-430. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.054>.
25. Koryukin G.L. Criteria for predictive assessment of oil and gas potential of Arctic water areas based on geochemical studies. *Geology of Oil and Gas*. 2003;4:36-42. (In Russ.).
26. Starobinets I.S. *Geological and geochemical features of gas condensates*. Leningrad: Nedra; 1974, 151 p.
27. Prishchepa O.M. Problems of replacing hydrocarbon reserves: Arctic shelf and/or hard-to-recover reserves. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2016;1-2:18-34. (In Russ.). EDN: VZYNDD.
28. Larskaya E.S. Use of organic matter geochemistry for oil and gas exploration purposes. *Geology of Oil and Gas*. 1990;10:20-24. (In Russ.).
29. Burshtein L.M. *Methodology of an integrated approach to determining the age of intrusive formations of Eastern Siberia*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS; 2001, 280 p. (In Russ.).
30. Abrams M.A. Evaluation of near-surface gases in marine sediments to assess subsurface petroleum gas generation and entrapment. *Geosciences*. 2017;7(2):35. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020035>. EDN: YGHHYF.
31. Alekseev F.A., Guzhevsky V.A. *Fundamentals of litho-geochemical exploration for oil and gas*. Novosibirsk: Nauka; 1984, 192 p. (In Russ.).
32. Aluker E.D., Kucheruk E.V., Petukhov A.V. Geochemical methods of oil and gas exploration in the USSR and abroad. *Results of Science and Technology*. Moscow: VINITI; 1989, vol. 16, p. 177-178. (In Russ.).
33. Kalinin A.I. Prospects of oil and gas content of the north-eastern part of the Aldan anticline. *Oil Industry*. 2019;6:22-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-6-22-27>. EDN: GXRFFY.
34. Dmitrievsky A.N. Fundamental problems of oil and gas geology. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2004;12:4-7. (In Russ.). EDN: HRYUAV.
35. Andreeva N.N., Borkovsky A.A., Veres S.P., Sokolov A.V., Khmelevsky M.S. Application prospects of direct geochemical methods for prospecting relatively small oil and gas deposits in Western Siberia. *Geology of Oil and Gas*. 2001;4:53-57. (In Russ.). EDN: VVZCGO.
36. Punanova S.A. Hydrocarbon systems and combined traps of the Lower-Middle Jurassic deposits of the northern regions of Western Siberia. *Oil and Gas Exposition*. 2021;3:22-27. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2021-3-22-27>. EDN: QZBTVT.
37. Shuster V.L. Prospects for exploration and development of large oil and gas fields in mega-reservoirs of the northern part of the West Siberian oil and gas province. *Current Problems of Oil and Gas*. 2022;4. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-39.art6>.

#### Информация об авторах / Information about the authors



##### **Черемисин Илья Олегович,**

ведущий инженер лаборатории комплексных исследований Арктики,  
Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ [cheremisin@crust.irk.ru](mailto:cheremisin@crust.irk.ru)  
<https://orcid.org/0009-0001-0406-8489>

##### **Ilya O. Cheremisin,**

Lead Engineer of the Laboratory for Comprehensive Arctic Studies,  
Institute of the Earth's Crust,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ [cheremisin@crust.irk.ru](mailto:cheremisin@crust.irk.ru)  
<https://orcid.org/0009-0001-0406-8489>



**Стукова Елизавета Владимировна**,  
инженер-геолог,  
ООО «Производственно-геологическая компания “Сибгеоком”»,  
рп. Маркова, Российская Федерация,  
sibgeo@sibanalyt.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-1055-5685>  
**Elizaveta V. Stukova**,  
Geological Engineer,  
LLC “Production and Geological Company ‘Sibgeocom’”,  
Markova settlement, Russian Federation,  
sibgeo@sibanalyt.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-1055-5685>

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

И.О. Черемисин – формальный анализ, разработка концепции, написание черновика рукописи.  
Е.В. Стукова – визуализация, редактирование рукописи.  
Ilya O. Cheremisin – formal analysis, conceptualization, writing – original draft.  
Elizaveta V. Stukova – visualization, writing – editing.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 03.03.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.  
The article was submitted 03.03.2026; approved after reviewing 12.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Краткое сообщение

УДК 622.276.6

EDN: RFSBBY

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-4



## Многосторонняя стимуляция пласта как альтернатива гидравлическому разрыву для карбонатных коллекторов с тонкими нефтяными оторочками

И.А. Ярошук<sup>a</sup>, В.Ю. Панфилов<sup>b</sup>, П.С. Пушмин<sup>c</sup>, Д.С. Подоляко<sup>d</sup><sup>a-c</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация<sup>d</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация

**Резюме.** Рассмотрена технология многосторонней стимуляции ствола скважины (Multilateral Stimulation Technology), предназначенная для повышения нефтеотдачи в карбонатных коллекторах с низкой вертикальной проницаемостью и малой эффективной нефтенасыщенной толщиной. Целью исследования является анализ эффективности Multilateral Stimulation Technology при разработке тонких нефтяных оторочек мощностью менее 5 м в условиях высокой неоднородности и трещиноватости пород. В качестве объекта исследования рассмотрены горизонтальные и наклонно-направленные скважины, оборудованные системой радиального вскрытия пласта с использованием выдвижных игл. Предметом исследования являются технологические особенности применения Multilateral Stimulation Technology, включая модификации с кислотным разрушением породы перед соплом и механическим бурением мини-долотами с турбинным приводом. Методы исследования включают анализ промысловых данных, обобщение зарубежного и отечественного опыта, интерпретацию результатов эксплуатации, а также сравнительную оценку с традиционным гидроразрывом пласта. Рассмотрены механизмы формирования радиальных каналов, влияние геологических факторов на эффективность технологии и особенности моделирования процессов фильтрации. Результаты исследования показывают, что Multilateral Stimulation Technology обеспечивает контролируемое увеличение дренируемого объема пласта, снижение риска прорыва воды и газа, а также повышение коэффициента продуктивности скважин в 2–4 раза по сравнению с необработанными аналогами. Использование кислотной активации и турбинного бурения повышает глубину и стабильность проникновения боковых каналов. Установлено, что технология наиболее эффективна в карбонатных коллекторах с проницаемостью 0,1–10 мД и низким отношением  $Kv/Kh$ . Сделан вывод о высокой перспективности Multilateral Stimulation Technology для вовлечения трудноизвлекаемых запасов в тонких нефтяных оторочках, а также о целесообразности ее широкого внедрения на месторождениях Российской Федерации в качестве альтернативы неконтролируемому гидроразрыву пласта.

**Ключевые слова:** многосторонняя стимуляция, Fishbones, карбонатный коллектор, тонкая нефтяная оторочка, радиальные каналы, кислотная обработка, мини-долото, турбинный привод, низкая вертикальная проницаемость, интенсификация добычи

**Для цитирования:** Ярошук И.А., Панфилов В.Ю., Пушмин П.С., Подоляко Д.С. Многосторонняя стимуляция пласта как альтернатива гидравлическому разрыву для карбонатных коллекторов с тонкими нефтяными оторочками // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 46–54. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-4>. EDN: RFSBBY.

### Brief report

## Multilateral stimulation technology as an alternative to hydraulic fracturing for carbonate reservoirs with thin oil rims

Ilya A. Yaroshchuk<sup>a</sup>, Vladimir Yu. Panfilov<sup>b</sup>,  
Pavel S. Pushmin<sup>c</sup>, Dmitry S. Podoliako<sup>d</sup><sup>a-c</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation<sup>d</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** The paper considers Multilateral Stimulation Technology, a wellbore stimulation technology designed to enhance oil recovery in carbonate reservoirs with low vertical permeability and low effective oil pay. The purpose of the study is to analyze Multilateral Stimulation Technology efficiency in reservoirs with oil rims thinner than 5 m in highly heterogeneous and fractured rock conditions. The object of research is horizontal and directional wells equipped with radial formation drilling system using retractable needles. The subject of the study is technological features of Multilateral Stimulation Technology application including modifications involving acidizing of the rock ahead of the nozzle and mechanical drilling with turbine-driven mini-bits.



The research methods include field data analysis, a review of international and domestic experience, interpretation of field results, as well as a comparative assessment with traditional hydraulic fracturing. The mechanisms of radial laterals formation, the influence of geological factors on technology efficiency, and filtration process modeling features are examined. The study results demonstrate that Multilateral Stimulation Technology provides a controlled increase in reservoir drainage volume, reduces the risk of water and gas breakthrough, and increases well productivity by 2–4 times compared to untreated wells. Acid activation and turbine drilling significantly increase the penetration depth and stability of lateral channels. The technology was found to be most effective in carbonate reservoirs with permeability of 0.1–10 mD and a low  $K_v/K_h$  ratio. It is concluded that Multilateral Stimulation Technology represents a promising alternative for developing thin oil rims and hard-to-recover reserves in the Russian Federation, offering a controlled substitute for conventional hydraulic fracturing.

**Keywords:** multilateral stimulation, Fishbones, carbonate reservoir, thin oil rim, radial laterals, acidizing, mini-bit, turbine drive, low vertical permeability, production stimulation

**For citation:** Yaroshchuk I.A., Panfilov V.Yu., Pushmin P.S., Podoliako D.S. Multilateral stimulation technology as an alternative to hydraulic fracturing for carbonate reservoirs with thin oil rims. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):46-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-4>. EDN: RFSBBY.

### Введение

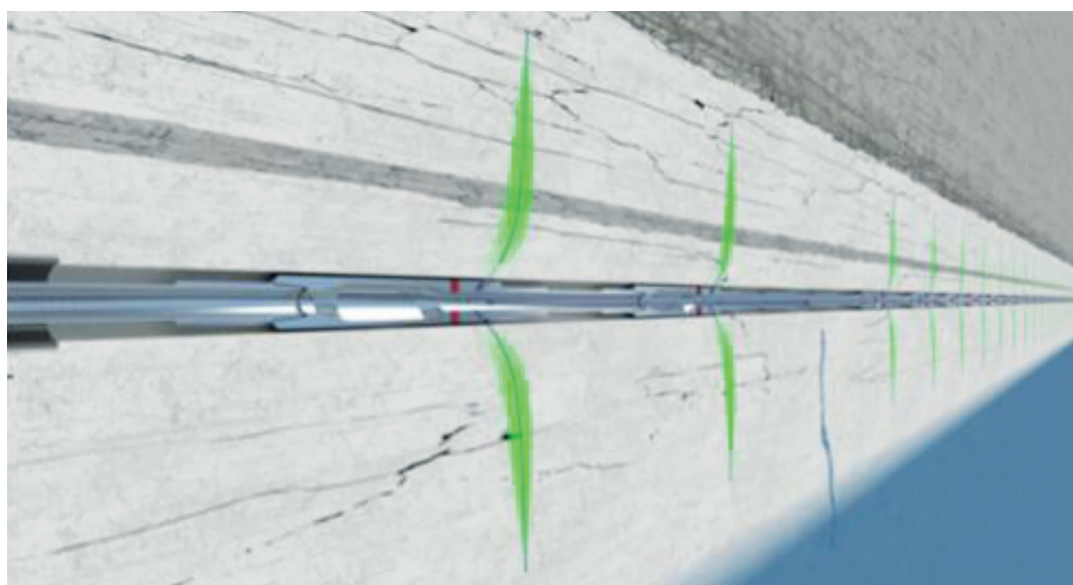
Разработка карбонатных коллекторов с малой нефтенасыщенной толщиной и близким расположением водонефтяного и газонефтяного контактов является одной из наиболее сложных задач нефтегазовой отрасли [1, 2]. В подобных условиях применение гидравлического разрыва пласта часто сопровождается неконтролируемым ростом трещин и преждевременным обводнением скважин [3].

Многочисленные исследования указывают на снижение эффективности гидроразрыва пласта (ГРП) в естественно-трещиноватых и расслоенных коллекторах вследствие высокой чувствительности к напряженному состоянию пласта [4, 5]. В результате наблюдаются рост обводненности, снижение не-

фтеотдачи и увеличение эксплуатационных затрат [6].

В качестве альтернативного подхода в зарубежной практике получила развитие технология многосторонней стимуляции ствола скважины, реализуемая в системах Fishbones и MJST (Multilateral Jetting Stimulation Technology) [7, 8]. Данная технология основана на формировании системы радиальных боковых каналов, обеспечивающих механическую связь скважины с удаленными зонами пласта (рис. 1).

Работы последних лет показали, что геометрия подобных систем может быть эффективно описана с применением встроенных дискретных трещин EDFM (встроенная дискретная модель разрушения, *от англ.*: Embedded Discrete Fracture Model)<sup>1</sup> [9–11].



**Рис. 1. Иглы в активированном положении, контроль расстояния до нежелательного флюида**  
**Fig. 1. Needles in activated position, monitoring of the distance to the unwanted fluid**

<sup>1</sup> Moinfar A. Discrete fracture modeling of tight and naturally fractured reservoirs: PhD thesis. Stanford: Stanford University, 2013. 240 p.



Это позволило рассматривать боковые каналы как аналог управляемых микротрещин.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью систематизации накопленного опыта применения MST (технология многостороннего стимулирования, *от англ.*: Multilateral Stimulation Technology) и оценки ее потенциала для разработки тонких нефтяных оторочек в условиях месторождений Российской Федерации [12].

Целью настоящей работы являются системный анализ эффективности технологии многосторонней стимуляции ствола скважины при разработке карбонатных коллекторов с тонкими нефтяными оторочками, а также обоснование ее преимуществ по сравнению с традиционными методами интенсификации притока, включая гидравлический разрыв пласта, на основе анализа современных исследований и промысловых данных [13, 14].

#### Материалы и методы исследования

**Исходная база данных.** В работе применен метод аналитического литературного обзора, включающий систематизацию и критический анализ современных зарубежных и отечественных публикаций, посвященных технологии многосторонней стимуляции скважин и радиального вскрытия пласта:

– публикации SPE и SOCAR Proceedings по MST и MJST [7, 8, 15];

– материалы Fishbones AS и Schlumberger<sup>2</sup> [16, 17];

– результаты лабораторных испытаний кислотных систем [18];

– данные гидродинамического моделирования [9–11];

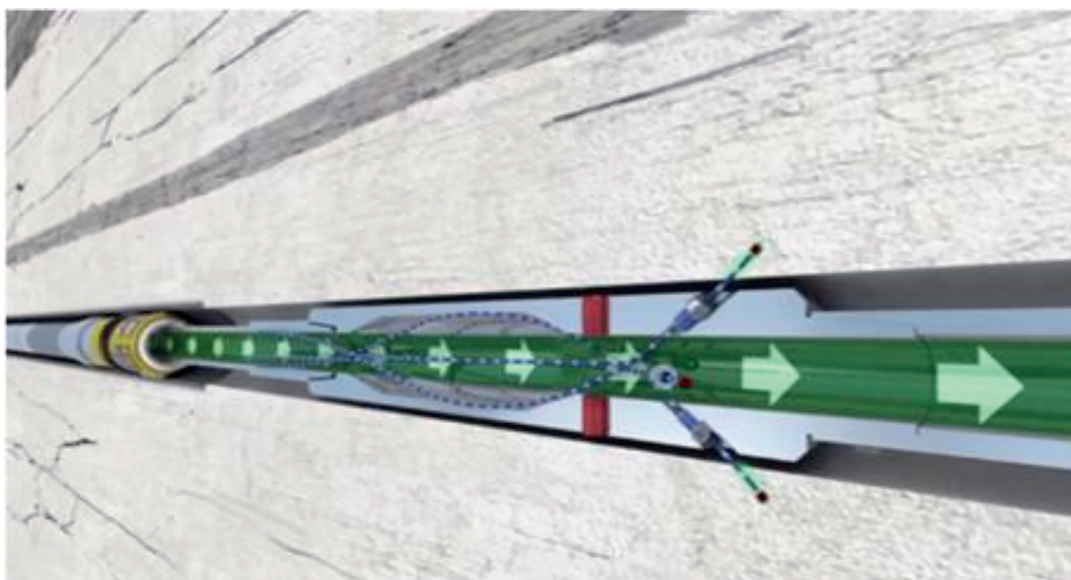
– отчеты о промысловых испытаниях<sup>3</sup> [12, 19].

В отличие от экспериментальных исследований, представленных в первоисточниках, в данной работе проводится обобщение результатов и их интерпретация применительно к условиям карбонатных коллекторов Российской Федерации<sup>4</sup> [20].

**Конструкция системы MST.** Система MST включает муфты с радиальными каналами, выдвижные иглы, гидравлические камеры, кислото-растворимые элементы и режущий инструмент для восстановления проходного сечения [16].

После установки хвостовика и пакерной подвески осуществляется гидравлическая активация, в результате которой иглы внедряются в пласт под действием давления рабочей жидкости [7].

**Методика кислотного проникновения.** В кислотной модификации MST используется соляная кислота, подаваемая под давлением через сопла игл (рис. 2) [18].



**Рис. 2. Внедрение игл в пласт благодаря прокачиванию под давлением соляной кислоты**  
**Fig. 2. Introduction of needles into the formation by pumping hydrochloric acid under pressure**

<sup>2</sup> Schlumberger. Fishbone wells Technical Report. Houston, 2014. 80 p.

<sup>3</sup> Deloitte. Oilfield service market review. London, 2019. 120 p.

<sup>4</sup> Ahmed T. Reservoir engineering handbook. 2010. 1472 p.



Кислота разрушает карбонатную матрицу, снижая сопротивление внедрению и формируя расширенные каналы [21]. Испытания проводились в камерах давления с экстраполяцией на пластовые условия [18].

**Методика механического бурения.** В модификации с мини-долотами используются турбинные приводы, работающие за счет прокачки раствора (рис. 3) [8].

Данная система обеспечивает устойчивое бурение плотных известняков и доломитов при минимальном боковом уводе [17].

**Гидродинамическое моделирование.** Для анализа фильтрационных процессов применялись модели тройной пористости с использованием EDFM [9, 10].

Моделирование включало:

- согласование истории добычи;
- анализ чувствительности;
- оптимизацию числа каналов;
- оценку зон дренирования [11].

### Результаты исследования и их обсуждение

Представленные результаты основаны на совокупности промысловых данных, результатах гидродинамического моделирования и лабораторных исследований взаимодействия кислотных растворов с карбонатной породой.

**Промысловые внедрения.** Согласно опубликованным данным, системы MST и MJST внедрены более чем в 120 скважинах в Северной Америке, Норвегии и на Ближнем Востоке [7, 15, 16].

Технология применялась в добывающих и нагнетательных скважинах, включая морские месторождения [17].

**Эффективность радиального вскрытия.** Полевые данные показывают устойчивый рост дебита нефти и снижение скин-фактора [7, 12].

Радиальные каналы эффективно обходят зоны повреждения призабойной зоны, формируя равномерное распределение притока [4].

**Анализ чувствительности.** Анализ чувствительности выявил влияние числа каналов на накопленную добычу [11].

Установлено, что увеличение количества ответвлений до 8–12 обеспечивает максимальный прирост, после чего наступает эффект насыщения [11].

При 15 каналах индекс продуктивности превышал базовый вариант в 3,3 раза [11].

**Лабораторные и стендовые испытания.** Испытания кислотных систем выявили зависимость скорости растворения от давления и температуры [18, 21].

Дополнительно использованы результаты лабораторных исследований взаимодействия соляной кислоты с карбонатным керном, проведенных при моделировании пластовых условий. Установлено, что при использовании растворов HCl концентрацией 12–15 % происходит более интенсивное растворение карбонатной матрицы с формированием каналов растворения и ростом проницаемости в 2–5 раз по сравнению с исходными значениями.

Экспериментально показано, что скорость растворения карбонатных пород зависит от их минерального состава и текстурных особенностей. Наиболее интенсивное растворение наблюдалось в породах, содержащих повышенное количество доломита и характеризующихся развитой системой вторичной пористости (рис. 4).

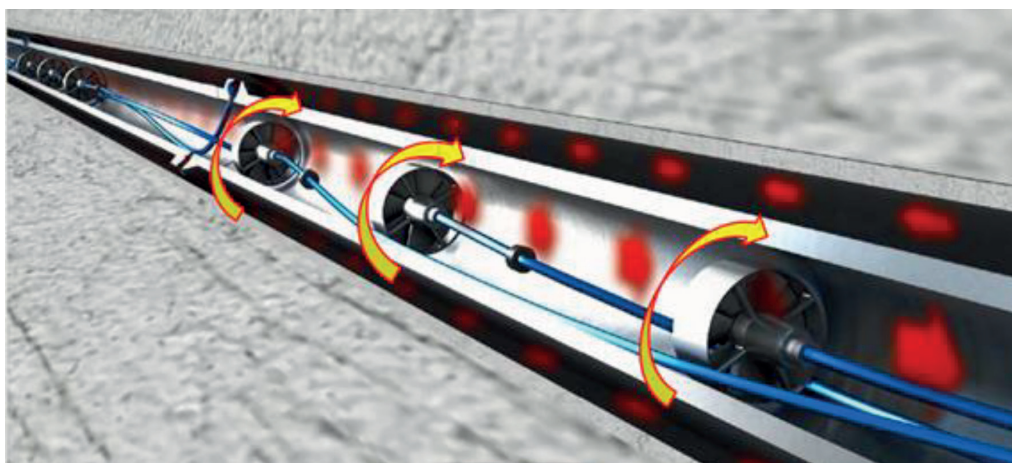
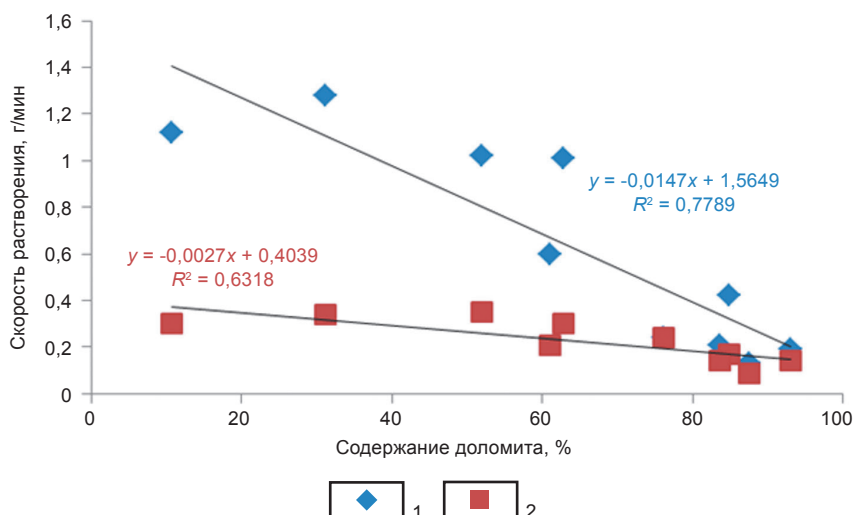


Рис. 3. Турбинные приводы (модификация с мини-долотами)  
Fig. 3. Turbine drives (mini-bit modification)



**Рис. 4. Зависимость степени растворения породы от времени воздействия соляной кислоты:**

1 – скорость реакции за 15 мин; 2 – скорость реакции за 1 ч

**Fig. 4. Degree of rock dissolution vs time of exposure to hydrochloric acid:**

1 – reaction rate in 15 min; 2 – reaction rate in 1 hour

Результаты эксперимента показали, что при воздействии соляной кислоты происходит интенсивное разрушение карбонатного скелета породы. В ряде образцов степень растворения породы превышала 80 %, что свидетельствует о значительном изменении структуры порового пространства.

Как видно из рис. 5, кислотное воздействие приводит к разрушению породы и формированию направленных каналов растворения, обеспечивающих резкое увеличение проницаемости. Данный механизм является ключевым при реализации кислотной модификации MST и обеспечивает снижение сопротивления внедрению игл.

Полученные результаты согласуются с зарубежными исследованиями кислотной стимуляции карбонатных коллекторов, где отмечается формирование так называемых wormholes, обеспечивающих эффективный приток флюидов [22, 23].

Сравнительный анализ с результатами моделирования гидроразрыва пласта показал, что при использовании ГРП наблюдается высокая вероятность выхода трещины за пределы нефтенасыщенного интервала, что приводит к преждевременному обводнению продукции.

В то же время применение технологии MST обеспечивает локализованное воздействие на пласт и формирование каналов строго в пределах продуктивного интервала. Расчеты показывают, что при использовании MST коэффициент вовлечения запасов возрастает на 20–35 % по сравнению с ГРП при разработке тонких нефтяных оторочек.

Полученные результаты подтверждаются зарубежными исследованиями, где отмечается преимущество управляемых радиальных каналов перед гидравлическими трещинами в условиях высокой неоднородности коллектора [24, 25].



**Рис. 5. Изменение структуры карбонатного ядра до (а) и после (б) кислотного воздействия**  
**Fig. 5. Changes in the structure of the carbonate core before (a) and after (b) acidizing**



Испытания режущего инструмента подтвердили устойчивую работу при осевых нагрузках до 1500 кг [17].

*Сравнение с гидроразрывом пласта.* В отличие от ГРП, геометрия каналов MST задается конструктивно и не зависит от поля напряжений [3, 5].

Это обеспечивает высокий уровень управляемости процесса стимуляции и минимизацию рисков прорыва воды и газа [6].

*Оптимизация конфигурации.* Наличие точки насыщения добычи указывает на необходимость оптимального проектирования числа каналов [11].

Избыточное количество ответвлений увеличивает капитальные затраты без пропорционального прироста добычи [8].

*Надежность системы.* Разработка систем контроля выноса твердых частиц позволила адаптировать технологию к мягким меловым породам [15].

Это снижает риск заиливания и обрушения каналов [17].

*Ограничения технологии.* Основными ограничениями MST являются:

- сложность масштабирования лабораторных данных [18];
- зависимость от качества буровых растворов [7];
- необходимость буровой установки для MJST [8];
- высокая требовательность к инженерному сопровождению [12].

## Заключение

На основе анализа литературных источников и промысловых данных установлено, что технология многосторонней стимуляции ствола скважины является эффективным инструментом повышения нефтеотдачи карбонатных коллекторов с тонкими нефтяными оторочками [7, 12].

Основные выводы:

1. MST обеспечивает контролируемое расширение зоны дренирования пласта [8, 16].
2. Радиальные каналы позволяют обойти поврежденные зоны и снижать скин-эффект [4].
3. Кислотная и механическая модификация расширяют область применения технологии [17, 18].
4. EDFM-моделирование подтверждает наличие оптимального количества каналов [9–11].
5. Прирост индекса продуктивности достигает 3–4 раз [11].
6. Технология перспективна для внедрения на месторождениях Российской Федерации [12, 19].

Таким образом, MST может рассматриваться как научно обоснованная альтернатива традиционному гидроразрыву пласта при разработке трудноизвлекаемых запасов карбонатных коллекторов.

## Список источников

1. Аширов К.Б., Выжигин Г.Б. Оценка эффективности солянокислотных обработок скважин в карбонатных коллекторах // Нефтяное хозяйство. 1977. № 7. С. 28–31. Режим доступа: [https://www.oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?art=108219](https://www.oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?art=108219) (дата обращения: 23.01.2026).
2. Мухаметшин В.Ш. Зависимость коэффициента нефтеотдачи от плотности сетки скважин при разработке малопродуктивных карбонатных залежей // Нефтяное хозяйство. 1989. № 12. С. 26–29. Режим доступа: [https://oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=8155&art=122334](https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=8155&art=122334) (дата обращения: 23.01.2026).
3. Manchanda R., Sharma M.M. Impact of completion design on fracture complexity in horizontal shale wells // SPE Drilling and Completion. 2014. Vol. 29. Iss. 1. P. 10–21. Режим доступа: <https://onepetro.org/DC/article-abstract/29/01/78/205825/Impact-of-Completion-Design-on-Fracture-Complexity?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 23.01.2026).
4. Hognesen E.J., Strand S., Austad T. Waterflooding of preferential oil-wet carbonates – oil recovery related to reservoir temperature and brine composition (SPE94166) // 67th EAGE Conference and Exhibition. 2005. P. 1–9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.1.D026>.
5. Olson K.E., Olsen E., Haidar S., Boulatsel A., Brekke K. Valhall field: horizontal well stimulations “Acid vs. Proppant” and best practices for fracture optimization // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Proceedings-Mile High Meeting of the Minds (Denver, 5–8 October 2003). Denver: Society of Petroleum Engineers, Inc., 2003. P. 2947–2963. <https://doi.org/10.2118/84392-ms>. EDN: PJGXOR.
6. Сучков Б.М. Причины снижения продуктивности скважин // Нефтяное хозяйство. 1988. № 5. С. 52–54. Режим доступа: [https://oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=8143&art=6656](https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=8143&art=6656) (дата обращения: 23.01.2026).
7. Rice K., Jorgensen T., Waters J.W. First installation of efficient and accurate multilaterals stimulation technology in carbonate oil application // SPE-171021-MS. 2014. P. 1–15. <https://doi.org/10.2118/171021-MS>.
8. Freyer R., Stang A., Dusterhoff D., Meyer J., Røste T., Haug K. Multilateral stimulation technology // SPE-121814. 2009. P. 1–14. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEEFDC/proceedings-abstract/09EFDC/09EFDC/SPE-121814-MS/146381?redirectedFrom=PDF> (дата обращения: 24.01.2026).



9. Bagheri M., Settari A. Modeling of geomechanics in naturally fractured reservoirs // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2008. Vol. 11. P. 108–118.
10. Moinfar A., Varavei A., Sepehrnoori K., Johns R.T. Development of an efficient embedded discrete fracture model for 3D compositional reservoir simulation in fractured reservoirs // *SPE Journal*. 2014. Vol. 19. Iss. 2. P. 289–303. <https://doi.org/10.2118/154246-PA>.
11. Panfili P., Jomaa A., Lydon S., McClure M., Cazeneuve E., Lee S. EDFM Workshop Proceedings. Houston, 2013. 20 p.
12. Хасанов Г.В. Обзор технологии Fishbones AS – повышение сообщаемости пластов. Казань: Татбурнефть, 2019. 65 с.
13. Al-Khelaiwi F.T., et al. Radial drilling and reservoir performance // *SPE Journal*. 2008.
14. Economides M.J., Hill A.D., Ehlig-Economides C., Zhu Ding. Petroleum production systems // *Sugarhouse Book Works*. 2012.
15. Мухаметшин В.В., Андреев А.В., Котенёв Ю.А. Прогноз продуктивности залежей в карбонатных коллекторах с трудноизвлекаемыми запасами // *SOCAR Proceedings*. 2016. № 3. С. 40–45. <https://doi.org/10.5510/OGP20160300287>.
16. Fishbones A.S. Multilateral stimulation technology manual. Stavanger, 2015. 110 p.
17. Al-Kobaisi, M., Kazemi, H., Ramirez, B., Ozkan, E., and Atan, S. A critical review for proper use of water/oil/gas transfer functions in dual-porosity naturally fractured reservoirs: part II // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2009. Vol. 12. P. 211–217.
18. Nasr-El-Din H.A., Domen M.V., Sierra L., Welton T. Optimization of surfactant-based fluids for acid diversion // *SPE Journal*. 2007. Vol. 12. Iss. 3. P. 311–320. <https://doi.org/10.2523/107687-MS>.
19. Babadagli T., Al-Salmi S. A review of permeability-prediction methods for carbonate reservoirs using well-log data // *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2004. Vol. 7. Iss. 2. P. 75–88. <https://doi.org/10.2118/87824-PA>.
20. Neylon K., Reiso E., Holmes J.A., Nesse O.B. Modeling well inflow control with flow in both annulus and tubing // Paper SPE 118909 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands (Texas, 2–4 February, 2009). Texas, 2009. <https://doi.org/10.2118/118909-MS>.
21. Gomari K.A.R., Karoussi O., Hamouda A.A. Mechanistic study of water–rock interaction // *SPE Journal*. 2006. Vol. 11. Iss. 4. P. 421–429.
22. Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of transport and reaction on wormhole formation in porous media // *AIChE Journal*. 1998. Vol. 44. Iss. 9. P. 1933–1949. <https://doi.org/10.1002/aic.690440902>.
23. Hoefner M.L., Fogler H.S. Pore evolution and channel formation during flow and reaction in porous media // *AIChE Journal*. 1988. Vol. 34. Iss. 1. P. 45–54. <https://doi.org/10.1002/aic.690340107>.
24. Valko P., Economides M. Hydraulic fracture mechanics. Texas: Wiley, 1995. 298 p.
25. Babadagli T., Sultan Q.U. Scaling of cocurrent and countercurrent capillary imbibition for surfactant and polymer injection in naturally fractured reservoirs // *SPE Journal*. 2001. Vol. 6. P. 465–478. <https://doi.org/10.1306/A9673446-1738-11D7-8645000102C1865D>.

### References

1. Ashirov K.B., Vyzhigin G.B. Evaluation of the efficiency of hydrochloric acid treatment of wells in carbonate reservoirs. *Oil Industry*. 1977;7:28-31. Available from: [https://www.oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?art=108219](https://www.oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?art=108219) [Accessed 23th January 2026]. (In Russ.).
2. Mukhametshin V.Sh. Dependence of oil recovery factor on well spacing in the development of low-productivity carbonate reservoirs. *Oil Industry*. 1989;12:26-29. Available from: [https://oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=8155andart=122334](https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=8155andart=122334) [Accessed 23th January 2026]. (In Russ.).
3. Manchanda R., Sharma M.M. Impact of completion design on fracture complexity in horizontal shale wells. *SPE Drilling and Completion*. 2014;29(1):10-21. Available from: <https://onepetro.org/DC/article-abstract/29/01/78/205825/Impact-of-Completion-Design-on-Fracture-Complexity?redirectedFrom=fulltext> [Accessed 23th January 2026].
4. Hognesen E.J., Strand S., Austad T. Waterflooding of preferential oil-wet carbonates – oil recovery related to reservoir temperature and brine composition (SPE94166). In: *67th EAGE Conference and Exhibition*. 2005;1-9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.1.D026>.
5. Olson K.E., Olsen E., Haidar S., Boulatsel A., Brekke K. Valhall field: horizontal well stimulations “Acid vs. Proppant” and best practices for fracture optimization. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Proceedings-Mile High Meeting of the Minds*. 5–8 October 2003, Denver. Denver: Society of Petroleum Engineers, Inc.; 2003, p. 2947-2963. <https://doi.org/10.2118/84392-ms>. EDN: PJGXOR.
6. Suchkov B.M. Reasons of well productivity decrease. *Oil Industry*. 1988;5:52-54. Available from: [https://oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=8143andart=6656](https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=8143andart=6656) [Accessed 23th January 2026]. (In Russ.).
7. Rice K., Jorgensen T. Waters J.W. First installation of efficient and accurate multilaterals stimulation technology in carbonate oil application. *SPE-171021-MS*. 2014;1-15. <https://doi.org/10.2118/171021-MS>.
8. Freyer R., Stang A., Dusterhoff D., Meyer J., Røste T., Haug K. Multilateral stimulation technology. *SPE-121814*. 2009;1-14. Available from: <https://onepetro.org/SPEEFDC/proceedings-abstract/09EFDC/09EFDC/SPE-121814-MS/146381?redirectedFrom=PDF> [Accessed 24th January 2026].
9. Bagheri M., Settari A. Modeling of geomechanics in naturally fractured reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2008;11:108-118.



10. Moinfar A., Varavei A., Sepehrnoori K., Johns R.T. Development of an efficient embedded discrete fracture model for 3D compositional reservoir simulation in fractured reservoirs. *SPE Journal*. 2014;19(2):289-303. <https://doi.org/10.2118/154246-PA>. [Accessed 23th January 2026].
11. Panfili P., Jomaa A., Lydon S., McClure M., Cazeneuve E., Lee S. *EDFM Workshop Proceedings*. Houston; 2013, 20 p.
12. Khasanov G.V. *Overview of Fishbones AS technology – improving reservoir connectivity*. Kazan: Tatburneft; 2019, 65 p. (In Russ.).
13. Al-Khelaiwi F.T., et al. Radial drilling and reservoir performance. *SPE Journal*. 2008.
14. Economides M.J., Hill A.D., Ehlig-Economides C., Zhu Ding. Petroleum production systems. *Sugarhouse Book Works*. 2012.
15. Mukhametshin V.V., Andreev A.V., Kotenev Yu.A. Productivity forecast for deposits in carbonate reservoirs with hard-to-recover reserves. *SOCAR Proceedings*. 2016;3:40-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP20160300287>.
16. Fishbones A.S. *Multilateral stimulation technology manual*. Stavanger; 2015, 110 p.
17. Al-Kobaisi, M., Kazemi, H., Ramirez, B., Ozkan, E., and Atan, S. A critical review for proper use of water/oil/gas transfer functions in dual-porosity naturally fractured reservoirs: Part II. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2009;12:211-217.
18. Nasr-El-Din H.A., Domen M.V., Sierra L., Welton T. Optimization of surfactant-based fluids for acid diversion. *SPE Journal*. 2007;12(3):311-320. <https://doi.org/10.2523/107687-MS>.
19. Babadagli T., Al-Salmi S. A review of permeability-prediction methods for carbonate reservoirs using well-log data. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2004;7(2):75-88. <https://doi.org/10.2118/87824-PA>.
20. Neylon K., Reiso E., Holmes J.A., Nesse O.B. Modeling well inflow control with flow in both annulus and tubing. In: *Paper SPE 118909 presented at the SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands*. 2–4 February, 2009, Texas. Texas; 2009. <https://doi.org/10.2118/118909-MS>.
21. Gomari K.A.R., Karoussi O., Hamouda A.A. Mechanistic study of water–rock interaction. *SPE Journal*. 2006;11(4):421-429.
22. Fredd C.N., Fogler H.S. Influence of transport and reaction on wormhole formation in porous media. *AIChE Journal*. 1998;44(9):1933-1949. <https://doi.org/10.1002/aic.690440902>.
23. Hoefner M.L., Fogler H.S. Pore evolution and channel formation during flow and reaction in porous media. *AIChE Journal*. 1988;34(1):45-54. <https://doi.org/10.1002/aic.690340107>.
24. Valko P., Economides M. *Hydraulic fracture mechanics*. Texas: Wiley; 1995, 298 p.
25. Babadagli T., Sultan Q.U. Scaling of cocurrent and countercurrent capillary imbibition for surfactant and polymer injection in naturally fractured reservoirs. *SPE Journal*. 2001;6:465-478. <https://doi.org/10.1306/A9673446-1738-11D7-8645000102C1865D>.

#### Информация об авторах / Information about the authors



**Ярошук Илья Александрович,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ [ilya.yaroshuk@yandex.ru](mailto:ilya.yaroshuk@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-3955-8501>

**Ilya A. Yaroshchuk,**  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ [ilya.yaroshuk@yandex.ru](mailto:ilya.yaroshuk@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0009-0000-3955-8501>



**Панфилов Владимир Юрьевич,**

аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
[panfilov\\_vu@mai.ru](mailto:panfilov_vu@mai.ru)  
<https://orcid.org/0009-0004-1248-5567>

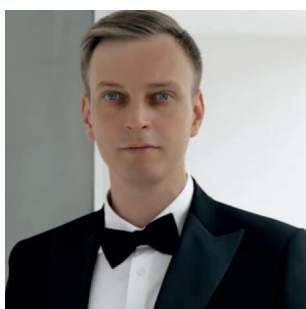
**Vladimir Yu. Panfilov,**  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
[panfilov\\_vu@mai.ru](mailto:panfilov_vu@mai.ru)  
<https://orcid.org/0009-0004-1248-5567>

**Пушмин Павел Сергеевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры нефтегазового дела,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
pps@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0001-5127-849X>

**Pavel S. Pushmin,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of Oil and Gas Engineering Department,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
pps@ex.istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0001-5127-849X>

**Подольяко Дмитрий Сергеевич,**

аспирант,  
Иркутский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
podolyakods@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0002-0138-220X>

**Dmitry S. Podoliako,**

Postgraduate Student,  
Irkutsk State University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
podolyakods@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0002-0138-220X>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

И.А. Ярошук – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.  
В.Ю. Панфилов – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.  
П.С. Пушмин – научное руководство, редактирование рукописи.  
Д.С. Подольяко – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.  
Ilya A. Yaroshchuk – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.  
Vladimir Yu. Panfilov – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.  
Pavel S. Pushmin – supervision, writing – editing.  
Dmitry S. Podoliako – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 26.02.2026.

The article was submitted 05.02.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 26.02.2026.



Научная статья  
УДК 552.3+553.493

EDN: ZPIHKQ

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-5



## Ниобиевое оруденение Большешетагнинского месторождения (Восточный Саян)

М.О. Сукнева<sup>a,✉</sup>, Т.А. Радомская<sup>b</sup>, В.В. Гавриленко<sup>c</sup>, А.Г. Чуешова<sup>d</sup>

<sup>a-d</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация

<sup>a</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация

**Резюме.** Большешетагнинское месторождение – одно из крупнейших известных эндогенных месторождений, перспективное для освоения ниобиевых руд. Оно приурочено к Зиминскому комплексу ультраосновных щелочных пород и карбонатитов позднерифейского возраста. Целью работы является выявление закономерностей распределения ниобия в породах и рудах Большешетагнинского щелочно-ультраосновного карбонатитового массива на разных этапах эндогенного и постмагматического процессов с помощью методов оптико-микроскопического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (микрозонд) и рентгенофлуоресцентного анализа. Установлено, что первичные ниобиевые руды относятся к полнокристаллическим апатит-слюдистым и апатит-пироксоловым породам. Основными минералами – концентраторами ниобия – в этих рудах является фторкальциопироксолом и ферроколумбит, отмечается тесный парагенезис апатита и пироксолом. Остальные (вторичные) типы руд связаны с продуктами изменения пироксолом из первичных руд и образовались вследствие переотложения ниобия в новых геохимических условиях. Вторичные ниобиевые руды представлены кальцитовыми карбонатитами, калишпатовыми и другими метасоматитами. Основные минералы в этих породах с наложенным ниобиевым оруденением – концентраторы ниобия – представлены ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом, ниобийсодержащим гематитом и новообразованным фторкальциопироксолом и ферроколумбитом. Пироксолом среди изученных пород представлен фторкальциопироксолом и уранпироксолом, значительно обогащенным танталом. Неизмененные фторкальциопироксолом из апатит-пироксолом, апатит-слюдистых пород и кальцит-полевошпатовой породы характеризуются выдержанным составом по CaO, Na<sub>2</sub>O и SrO. Измененные, гидратированные разности (по вакансии в позиции А) более характерны для метасоматических пород и кальцитовых карбонатитов с наложенной пироксолом минерализацией, что отражает разную степень флюидной переработки этих пироксолом. В результате проведенного исследования выявлено, что ниобиевые руды массива претерпели полифазное многостадийное преобразование, которое выражается в уменьшении содержания рудного компонента и различных оксидных формах нахождения ниобия во вторичных рудах по сравнению с первичными.

**Ключевые слова:** пироксолом, ниобий, Большешетагнинское месторождение

**Финансирование.** Исследования выполнены в рамках государственного задания по проекту № 0284-2021-0007.

**Благодарности.** Авторы благодарят А.Г. Дорошкевич, И.Р. Прокопьева, М.Н. Крука, И.А. Избродина (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация) за предоставление образца апатит-пироксолом руды Большешетагнинского массива для проведения исследования ниобиевой минерализации. Авторы признательны вышеперечисленным коллегам и Н.В. Алымовой за помощь в организации экспедиционных работ в районе Белозиминской группы щелочных массивов.

**Для цитирования:** Сукнева М.О., Радомская Т.А., Гавриленко В.В., Чуешова А.Г. Ниобиевое оруденение Большешетагнинского месторождения (Восточный Саян) // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 55–71. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-5>. EDN: ZPIHKQ.



## Original article

## Niobium mineralization of the Bolshetagninskoye deposit (Eastern Sayan)

Maria O. Sukneva<sup>a</sup>, Tatiana A. Radomskaia<sup>b</sup>,  
Veronika V. Gavrilenko<sup>c</sup>, Anastasia G. Chueshova<sup>d</sup>

<sup>a-d</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>a</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** The Bolshetagninskoye deposit is one of the largest known endogenous deposits, which is promising for niobium ore development. It is confined to the Ziminsky complex of ultramafic alkaline ultramafic alkaline rocks and carbonatites of Late Riphean age. The purpose of the study is to identify the distribution patterns of niobium in rocks and ores of the Bolshetagninskoye alkaline-ultramafic carbonatite massif at different stages of endogenic and postmagmatic processes using the methods of optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction electron microprobe analysis (microprobe), and X-ray fluorescence analysis. It has been determined that the primary niobium ores belong to holocrystalline apatite-mica and apatite-pyroxhlore rocks. The main minerals concentrating niobium in these ores are fluorocalciumpyroxhlore and ferrocolumbite. It is noted that a close paragenesis of apatite and pyroxhlore has been observed. The remaining (secondary) ore types are associated with pyroxhlore alteration products from primary ores and formed as a result of the redeposition of niobium in new geochemical conditions. Secondary niobium ores are represented by calcite carbonatites, potassium feldspar, and other metasomatites. The main minerals in these rocks with superimposed niobium mineralization – niobium concentrators – are presented by niobium-bearing rutile, ilmenorutile, niobium-bearing hematite, newly formed fluorocalciopyroxhlore and ferrocolumbite. Among the studied rocks pyroxhlore is represented by fluorocalciopyroxhlore and uraniumpyroxhlore, significantly enriched in tantalum. Unaltered fluorocalciopyroxhlores from apatite-pyroxhlore, apatite-mica, and calcite-feldspar rocks are characterized by a consistent composition of CaO, Na<sub>2</sub>O, and SrO. Altered, hydrated varieties (based on the A-site vacancy) are more characteristic of metasomatic rocks and calcite carbonatites with superimposed pyroxhlore mineralization. This reflects varying degrees of fluid processing of these pyroxhlores. The conducted study revealed that the niobium ores of the massif underwent a multiphase, multistage transformation, which is represented by a decrease in the ore component content and the presence of different oxide forms of niobium in secondary ores compared to primary ores.

**Keywords:** pyroxhlore, niobium, Bolshetagninskoye deposit

**Funding.** The research was carried out within the framework of the State assignment project No. 0284-2021-0007.

**Acknowledgements.** The authors thank A.G. Doroshkevich, I.R. Prokopiev, M.N. Kruk, and I.A. Izbrodin (V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia) for providing a sample of apatite-pyroxhlore ore from the Bolshetagninsky massif for the study of niobium mineralization. The authors are grateful to the above-mentioned colleagues and to N.V. Alymova for her assistance in organizing the fieldwork in the Beloziminskaya group of alkaline massifs.

**For citation:** Sukneva M.O., Radomskaia T.A., Gavrilenko V.V., Chueshova A.G. Niobium mineralization of the Bolshetagninskoye deposit (Eastern Sayan). *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):55-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-5>. EDN: ZPIHKQ.

### Введение

Минералы супергруппы пироклора относятся к сложным оксидам с общей формулой  $A_{2-m}B_2(X)_{6-w}Y_{1-n}$ , где  $A = Ca^{2+}, Na^+, Sr^{2+}, Ba^{2+}, Mn^{2+}, Sb^{3+}, Bi^{3+}, REE^{3+}, Th^{4+}, U^{4+}, H_2O^0, \square$ ;  $B = Nb^{5+}, Ta^{5+}, Ti^{4+}, Sb^{5+}, Sn^{4+}, Fe^{3+}, W^{6+}$ ;  $X = O, OH, F$ ;  $Y = OH^-, F^-, O^{2-}, H_2O^0, \square, K, Cs, Rb$  [1]. В современных работах используются две классификации минералов супергруппы пироклора: по Атенсио и др. [1] и по Хогарту и др. [2], которые применены и в данной работе.

Минералы супергруппы пироклора являются важным стратегическим сырьем на ниобий и тантал, также они могут содержать уран и легкие редкоземельные элементы. Все они включены в перечень основных видов стратегического минерального сырья (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 августа 2022 г. № 2473-р<sup>1</sup>). Одними из востребованных редких металлов являются ниобий и тантал – легирующие добавки к сплавам, металлы которых обладают устойчивостью к

<sup>1</sup> Распоряжение Правительства РФ от 30.08.2022 г. № 2473-р. Об утверждении Перечня основных видов стратегического минерального сырья. М., 2022. 3 с.



действию многих агрессивных сред, тугоплавкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, сверхпроводящими и другими свойствами. Основу сырьевой базы составляют пирохлоровые концентраты (пирохлор, бари-пирохлор) и менее 10 % ферроколумбит [3]. В России потребность в сырье тантала и ниобия удовлетворяется большей частью за счет импорта [3, 4].

Ниобиевые руды с пирохлором образуются в различных породах: щелочных ультраосновных (пегматитах нефелиновых сиенитов) и кислых породах (анорогенные граниты и пегматиты), в карбонатитах и связанных с ними щелочных породах. Значительные месторождения ниобия, тантала, редкоземельных элементов, циркония, бария, стронция, тория, железа, а также апатита и флюорита связаны с ультраосновными щелочно-карбонатитовыми массивами (УЩК) [5].

Объектом настоящего исследования является Большешетагнинское месторождение, расположенное в Иркутской области и относящееся к Зиминскому рудному району, перспективному для разработки ниобиевых руд [4]. Большешетагнинское месторождение приурочено к карбонатитовому комплексу одноименного массива УЩК, входящему в Зиминский комплекс УЩК возрастом  $632 \pm 2$  млн лет [6].

Большешетагнинское месторождение изучалось неоднократно. В начале 50-х годов результатом проверки местности аэрогамма-радиометрической съемкой стали аномалии, выявленные поисковой партией Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС, г. Москва, Россия), в результате чего был обнаружен Белозиминский массив УЩК с тантал-ниобиевой минерализацией<sup>2</sup>. В 1975 году Урикско-Ийской партией открыто Большешетагнинское месторождение при проведении ГДП-50 одноименного массива. Поисковые работы на нем проводились ПГО «Иркутскгеология» с перерывами с 1957 по 1975 год. В 1988–1992 годах выполнены оценочные работы, на основании которых установлена высокая перспективность месторождения на ниобий. В период 2008–2012 годы были возобновлены работы на месторождении ФГБУ ВИМС, произведен необходимый

для завершения оценочной стадии объем буровых и горных работ, в результате чего запасы Большешетагнинского месторождения в 2012 году были поставлены на государственный баланс. В мае 2023 года АО «СТ Элементы» приобрело на аукционе права на разработку Большешетагнинского месторождения, в результате чего было запланировано построение горно-обогачительного комбината. По состоянию на 2016 год балансовые запасы  $Nb_2O_5$  по категории  $C_1$  были оценены в 362 тыс. т, по категории  $C_2$  – в 4,5 тыс. т, забалансовые запасы – 9,5 тыс. т<sup>2</sup>. Технологии обогащения руд разрабатывались в ФГБУ ВИМС неоднократно [4]. В работе В.С. Пикаловой<sup>2</sup> были предложены схемы переработки и извлечения пирохлора из микроклинитовых, карбонатит-слюдитовых и слюдитовых руд с получением пирохлорового концентрата.

Большешетагнинский массив имеет округлую форму и зонально-кольцевое строение, он сложен пироксен-нефелиновыми породами серии мельтейгит – ийолит – уртит, нефелиновыми и щелочными сиенитами, калишпатовыми сиенитами и карбонатитами, также отмечаются поздние дайки пикритовых порфириров-айлликитов [5]. Формирование Большешетагнинского массива протекало в несколько последовательных этапов: на первом этапе произошло внедрение интрузивных пород серии мельтейгит – ийолит – уртит, затем нефелиновых и субщелочных сиенитов, становление массива завершилось внедрением карбонатитов и поздних даек айлликитов [5]. Внедрение УЩК вызвало фенитизацию вмещающих толщ, внедрение нефелиновых и субщелочных сиенитов, их калишпатизацию. По породам массива развито вторичное наложенное минералообразование, выраженное в карбонатизации, слюдитизации, гематитизации, сульфидитизации и флюоритизации вмещающих толщ.

Согласно данным предшественников, было выявлено, что основное богатое ниобиевое оруденение в отличие от других месторождений, связанных с интрузиями УЩК, приурочено не к карбонатитам, а к силикатным породам – микроклинитам (80–85 % руд, калишпатовым сиенитам по ультраосновным щелочным породам) и слюдитам (метасо-

<sup>2</sup> Пикалова В.С. Геолого-экономическая оценка нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд на примере Большешетагнинского месторождения: дис. ... кандидата геол.-минерал. наук: 25.00.11. М., 2018. 136 с. EDN: EEUVLR.



матитам карбонат-микроклин-биотитового состава<sup>2)</sup> [4]. Также отмечается рудоносная апатит-пирохлоровая линзовидная залежь [4]. Среди рудоносных пород карбонатитоидов отмечаются следующие разновидности: карбонат-микроклиновые (содержание карбонатов 15–20 %), карбонат-биотитовые (до 25 % прожилкового карбоната анкерит-доломитового ряда), существенно карбонатные (более 30 % карбонатов) [7].

Ранее пирохлоровая минерализация была изучена Л.К. Пожарицкой в работе [8], где первичный пирохлор Большетагнинского месторождения из микроклинитов и слюдитов представлен фторкальциопирохлором, в котором постоянно присутствует примесь стронция (0,021–0,034 ф. ед.) [7]. В работе Л.А. Азарановой [7] был описан калипирохлор, образованный в результате гипергенного изменения рудных микроклинитовых пород, и установлен гидратированный пирохлор.

Цель работы – раскрытие закономерностей распределения ниобия в породах и рудах Большетагнинского щелочно-ультраосновного карбонатитового массива на разных этапах эндогенного и постмагматического процессов. Выявление распределения рудных минералов в породах и рудах Большетагнинского массива, определение в них содержания ниобия необходимы в дальнейшем для уточнения поисковых критериев для более точного оконтуривания рудных залежей, разработки технологии извлечения полезных компонентов из новых комплексных типов руд, а также для создания модели процесса рудообразования.

### **Материалы и методы исследования**

В работе использованы результаты аналитических исследований пород и руд, выполненных на оборудовании Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» в Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук. Было исследовано 137 штучных образцов, более 120 шлифов и более 20 аншлифов. Характеристика образцов и определение диагностических свойств минералов выполнены с использованием

стереоскопического микроскопа Микромед MC-2-ZOOM Digital. Текстурно-структурные особенности пород и руд, их минеральный состав, морфологические особенности минералов и агрегатов, парагенетические минеральные ассоциации исследовались в шлифах и аншлифах петрографо-минераграфическим методом с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX-51 с 20–500-кратным диапазоном увеличения в проходящем и отраженном свете. Шлифы прокрашены по специальной методике, позволяющей наиболее эффективно оценить процентное соотношение полевых шпатов и фельдшпатоидов, карбонатов кальция и железа. Содержания редких элементов (ниобия, циркония, иттрия) в породах и рудах (120 проб) анализировались рентгенофлуоресцентным методом с помощью спектрометра VRA-30 (аналитики кандидаты химических наук В.М. Чубаров, А.А. Амосова, Т.С. Айсуева, Е.В. Чупарина, доктор технических наук А.Л. Финкельштейн). Пределы обнаружения элементов по используемой методике рентгенофлуоресцентного анализа составили: ниобий – 0,0005 %, цирконий – 0,0010 %, иттрий – 0,0010 %. Элементный состав основных породообразующих и рудных минералов был определен методом сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе MIRA 3 LMN TESCAN (6 препаратов аналитик А.Г. Чушова). Результаты количественного анализа пирохлора (6 препаратов), получены методом электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализа с помощью волновых спектрометров на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония, аналитик кандидат химических наук О.Ю. Белозерова).

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Из 122 исследованных образцов установлено, что 20 образцов содержат обильную ниобиевую минерализацию (при бортовом содержании  $Nb_2O_5$  более 0,3 масс. %). Согласно методическим рекомендациям<sup>3</sup>, рядовые руды этого месторождения содержат  $Nb_2O_5$  от 0,3 до 1,2 масс. % и при среднем содержании  $Nb_2O_5$  в руде – 1 масс. %. В проанализированных рудах среднее содержание  $Nb_2O_5$  составляет

<sup>3</sup> Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Ниобиевые, танталовые руды и редкоземельные элементы. М., 2007. 42 с.



1,5 масс. %. 13 проб соответствуют критериям рядовых руд, 7 проб отнесены к богатым и весьма богатым рудам – содержания  $Nb_2O_5$  в них попадают в интервал значений от 1,2 до 6,1 масс. % (рис. 1). Нами классифицированы два типа руд: первичные и вторичные. Первичные руды представлены апатит-сланцевыми и апатит-пироксеновой (apatитит) породами, относящимися к большинству исследованных руд (11 из 20 проб). Первичные апатит-сланцевые руды с пироксеном относятся к весьма богатым ( $Nb_2O_5 \sim 6,1$  масс. %), богатым ( $Nb_2O_5 > 1,2$  масс. %) и рядовым ( $Nb_2O_5 \sim 0,3$  масс. %) рудам. Содержание  $P_2O_5$  в этих породах достигает 12 масс. %. Основные ниобиевые рудные минералы первичных апатит-сланцевых руд – это пироксен и ферроколумбит. Остальные (вторичные) типы ниобиевых руд образовались путем переотложения ниобия по породам массива вследствие метасоматических и гидротермальных процессов. Вторичные руды относятся к богатым ( $Nb_2O_5 \sim 2$  масс. %) и рядовым рудам ( $Nb_2O_5 \sim 0,3$  масс. %). Основные рудные минералы этих пород представлены различными оксидами железа, титана, ниобия: ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом, ниобийсодержащим гематитом, новообразованным пироксеном и ферроколумбитом. Отмечается понижение содержания  $Nb_2O_5$  среди вторичных руд по сравнению с

первичными. Это, вероятно, связано с дисперсией ниобия в процессе метасоматоза и его рассеиванием в менее концентрированных минеральных формах – ниобийсодержащих рутиле и/или гематите. Вторичные ниобиевые руды представлены кальцитовыми карбонатитами, карбонат-apatит-эгирин-сульфидной породой и калиевополевошпатовыми метасоматитами.

В Большешетагнинском массиве минералы группы пироксена являются главными концентраторами ниобия и встречаются в апатит-пироксеновых, апатит-сланцевых рудах с сульфидами, кальцитовых карбонатитах и в метасоматитах.

Апатит-пироксеновая руда (apatитит) (рис. 2, а) представляет собой массивную полнокристаллическую породу светло-бежевого цвета, сложенную преимущественно апатитом (~ 85 об. %) и пироксеном (~ 10), калиевым полевым шпатом (~ 5). На фоне гипидиоморфных и ксеноморфных округлых изометричных и призматических агрегатов зерен апатита выделяются крупные (~ 0,2 мм) идиоморфные вкрапленники пироксена кубооктаэдрического габитуса (см. рис. 2, е–h). Калиевый полевой шпат наблюдается в виде «шлировых» обособлений среди основной массы породы (см. рис. 2, b, d). В апатит-пироксеновых породах цвет пироксенов при боковом освещении изменяется от бесцветного,

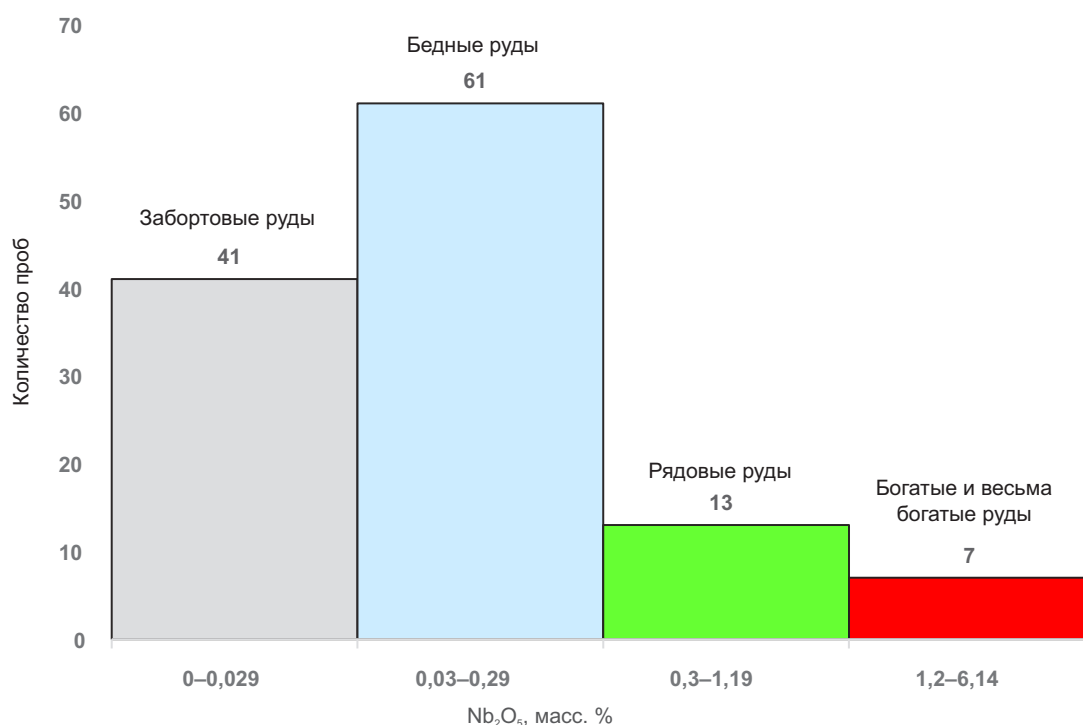


Рис. 1. Гистограмма встречаемости рудных содержаний ниобия в изученных породах массива  
Fig. 1. Histogram of niobium ore occurrence in the studied rocks of the massif

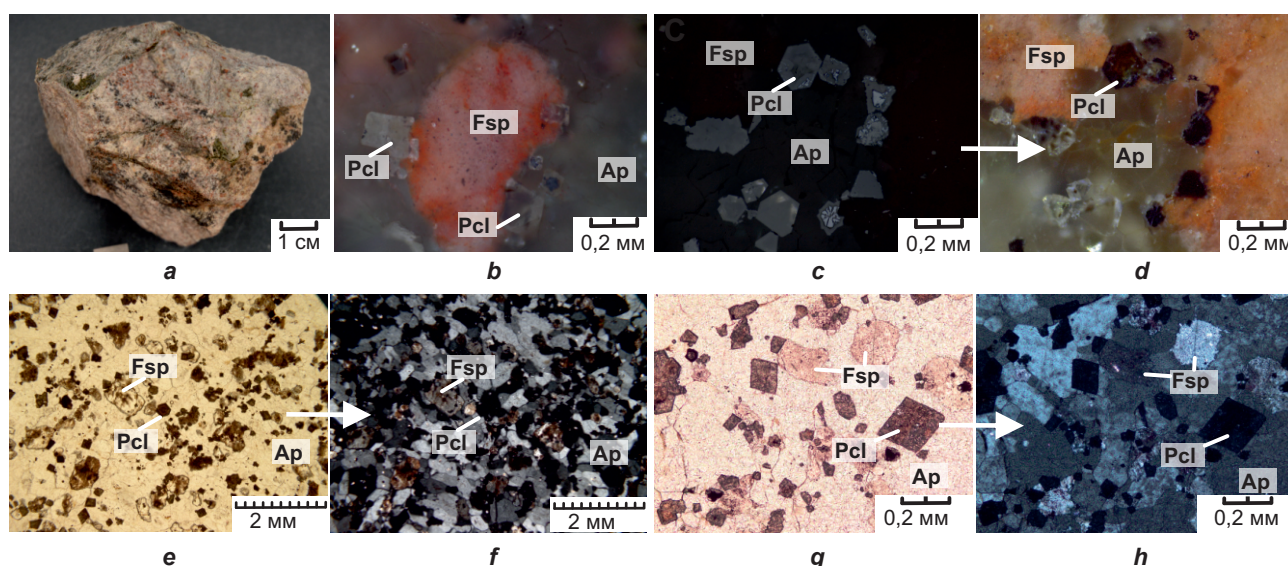


бледно-желтого, янтарно-желтого до бурого (см. рис. 2, *b, d*). Часто пироклор зональный, с секториальным распределением окраски, что также наблюдается в отраженном свете (рис. 2, *c, d*). Центральные части зерен некоторых пироклоров имеют дефекты поверхности и бурю окраску, а в отраженном свете они наблюдаются с более высоким коэффициентом отражения, вероятно, это обусловлено тем, что некоторые центральные части зерен имеют повышенные содержания оксидов железа.

Апатит-сланцевые руды являются полнокристаллическими средне- и мелкозернистыми породами черного цвета. Рудные апатит-сланцевые породы (рис. 3, *a*) состоят из (об. %) слюды – тетраферрианита (20–60), сульфидов (10–15), апатита (1–12), калиевого полевого шпата (0–10), пироклора и/или ферроколумбита (1–6), магнетита (менее 5), карбоната (менее 5). Текстура руды – пятнистая, вкрапленная, прожилково-вкрапленная. Слюда наблюдается в виде идиоморфных табличек и чешуек псевдогексагонального облика, буро-оранжевого цвета. Апатит занимает интерстиции между чешуйками слюды, образует призматические зерна. Калиевый полевой шпат наблюдается в виде «шлифовых» обособлений среди основной массы породы. Пироклор в

apatite-slate rocks is observed in the form of large and small idiomorphic brown grains, which form a mottled appearance, separate rounded clusters of grains of irregular shape and veins (see fig. 3, *b–e*). It is noted that there is a close paragenesis of pyrochlore and apatite. In apatite-tetraferriannite rocks, pyrochlore is homogeneous in color and reflective properties, its color changes from colorless to pale yellow under side illumination (see fig. 3, *f, g*). Also, in apatite-slate rocks, ferrocolumbite is widespread in the form of idiomorphic grains with numerous pores. It forms partial and complete pseudomorphs of pyrochlore. The degree of change of primary apatite-slate ores is insignificant. In apatite-slate rocks and ores to a different degree, iron sulfides are developed, mainly in the form of pyrite and pirrotine. Altered (carbonatized and kaolinitized) apatite-slate rocks are characterized by a low content of niobium oxide (~0.2% and less).

Рудные кальцитовые карбонатиты – это среднезернистые и мелкозернистые породы серого, розового, охристого или темно-коричневого цвета. Текстуры руд – полосчатая,



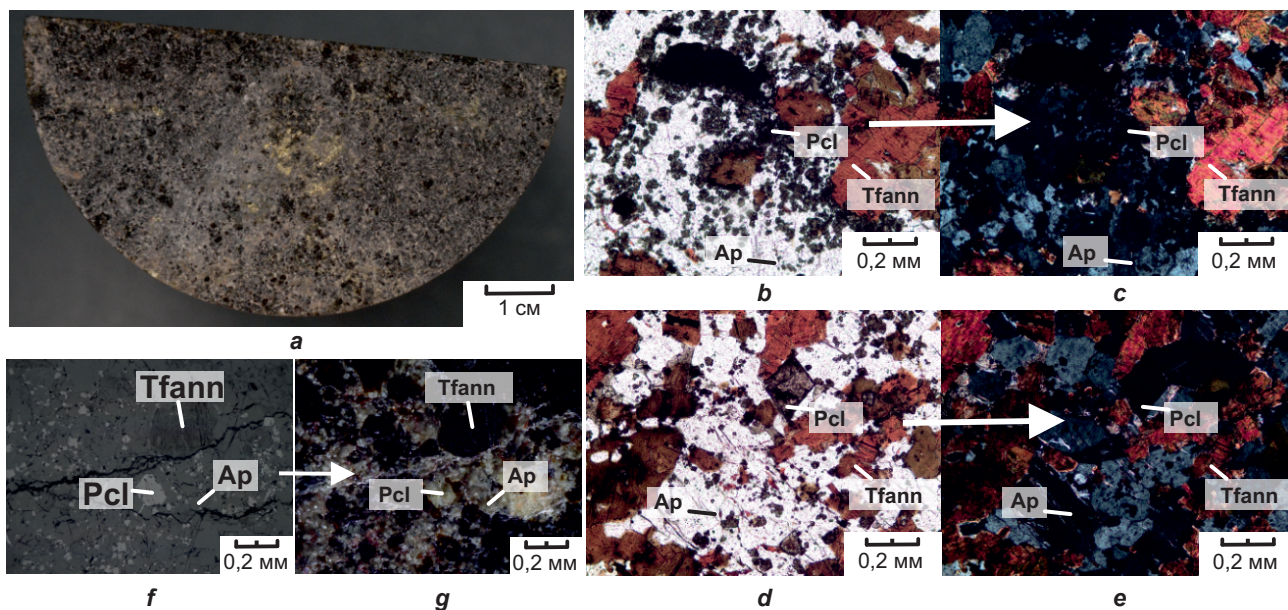
**Рис. 2. Рудная апатит-пироклоровая порода (апатитит) (образец БТГ-8-21):**  
*a* – фотография образца; *b–d* – микрофотографии шлифа: *c* – в отраженном свете,  
*b, d* – при боковом освещении; *e–h* – микрофотографии шлифа в проходящем свете:  
*e, g* – при одном поляризаторе, *f, h* – при скрещенных поляризаторах

*Pcl* – пироклор; *Fsp* – калиевый полевой шпат; *Ap* – апатит

**Fig. 2. Apatite-pyrochlore ore rock (apatitite) (sample BTG-8-21):**

*a* – photograph of the sample; *b–d* – micrographs of a polished section: *c* – in reflected light,  
*b, d* – with side illumination; *e–h* – micrographs of a thin section in transmitted light:

*e, g* – with a single polarizer, *f, h* – with crossed polarizers  
*Pcl* – pyrochlore; *Fsp* – potassium feldspar; *Ap* – apatite



**Рис. 3. Рудная апатит-слюдистая порода (образец БТГ-15-2):**

*a* – фотография образца: *b–e* – микрофотографии шлифа в проходящем свете:  
*b, d* – при одном поляризаторе, *c, e* – при скрещенных поляризаторах; *f, g* – микрофотографии аншлифа:  
*f* – в отраженном свете, *g* – при боковом освещении  
*Pcl* – пирохлор, *Tfann* – тетраферрианнит, *Ap* – апатит

**Fig. 3. Apatite-mica ore rock (sample БТГ-15-2):**

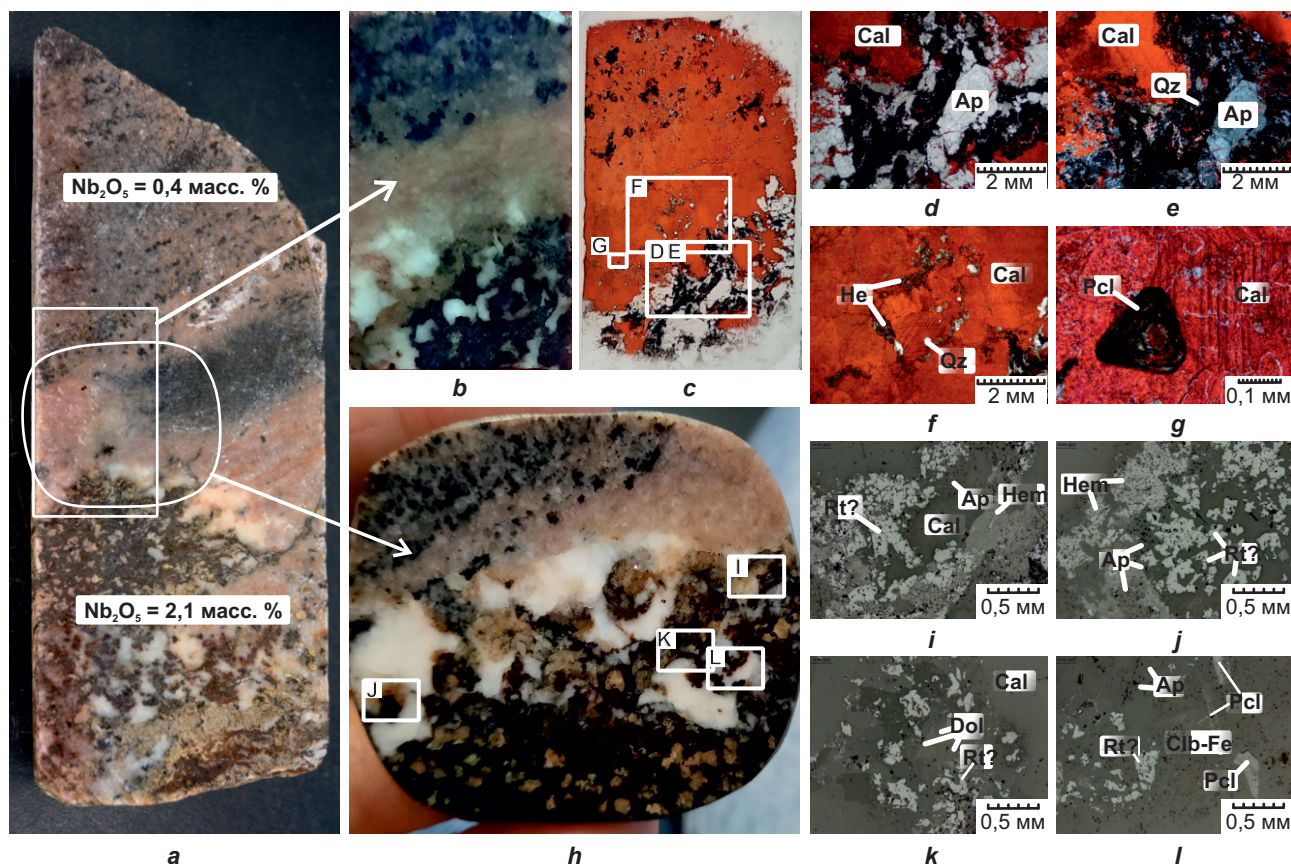
*a* – photograph of the sample; *b–e* – micrographs of a thin section in transmitted light:  
*b, d* – with a single polarizer, *c, e* – with crossed polarizers; *f, g* – micrographs of a polished section:  
*f* – in reflected light, *g* – with side illumination  
*Pcl* – pyrochlore, *Tfann* – tetraferriannite, *Ap* – apatite

линзовидная, прожилковая, прожилково-вкрапленная.

Образец апатит-кальцитового карбоната (БТГ-50) (рис. 4, *a*) сложен среднезернистым кальцитом розового цвета (~ 80 об. %) и апатитом (~ 20), также отмечается сидерит и доломит (см. рис. 4, *k*), кварц в виде идиоморфных зерен. Текстуры руды – пятнистая, полосчатая, прожилково-вкрапленная. Ниобиевое оруденение связано с продуктами изменения пирохлора – ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом, новообразованным ферроколумбитом, а также оксидами ниобия, железа и титана. Рутит, как основной рудный минерал, отмечается в виде аллотриоморфных зерен и агрегатов, образующих скопления и прожилки (см. рис. 4, *i–l*). Пирохлор наблюдается в виде единичных идиоморфных зерен, осколков зерен и реликтовых зерен, по которым развит ферроколумбит (см. рис. 4, *g, l*). Апатит-рутиловый парагенезис в кальцитовых карбонатах образует гнезда и прожилки. Порода в значительной степени была подвержена вторичным гидротермальным процессам – гематитизации и выщелачиванию пирохлора. Также наблюдается неравномерное распределение

рудного компонента в образце вследствие миграции ниобия под воздействием наложенных вторичных процессов (гематитизации).

В измененной карбонат-apatит-эгириносльфидной породе (рис. 5, *a*), пирохлор встречается в виде идиоморфных крупных зерен кубооктаэдрического габитуса и аллотриоморфных округлых зерен и скоплений зерен среди призматических зерен апатита и измененном эгирине. Текстура руды – пятнистая, прожилково-вкрапленная, вкрапленная. В проходящем свете цвет пирохлора бурый с каемкой более темного бурого цвета (см. рис. 5, *d*). При боковом освещении пирохлор имеет непостоянную окраску, изменяющуюся от янтарно-желтого, лимонно-желтого до светло-желтого в пределах одного зерна (см. рис. 5, *h, i*). Вероятно, цвет пирохлора связан с неоднородным химическим составом и присутствием уранил-иона в составе уранпирохлора (объясняется далее). Идиоморфный пирохлор часто зональный, с зонами развития ферроколумбита и уранпирохлора, а также с включениями гематита (см. рис. 5, *b, c*). Ферроколумбит в этих рудах наблюдается в виде частичной псевдоморфозы, он образует



**Рис. 4. Рудный апатит-кальцитовый карбонатит (образец БТГ-50):**

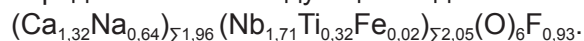
*a* – фотография образца; *b, c* – фотографии шлифа; *h* – фотографии аншлифа;  
*d-g, i-l* – микрофотографии шлифов и аншлифов апатит-карбонатитовой породы с пирохлоровым оруденением: *d-g* – в проходящем поляризованном свете, *d, f* – при одном поляризаторе, *e, g* – при скрещенных поляризаторах, *i-l* – в отраженном свете  
*Pcl* – пирохлор, *Cal* – кальцит, *Ap* – апатит, *Dol* – доломит, *Hem* – гематит,  
*Qz* – кварц, *Clb-Fe* – ферроколумбит, *Rt* – рутил

**Fig. 4. Ore apatite-calcite carbonatite (sample БТГ-50):**

*a* – photograph of the sample; *b, c* – photographs of a thin section; *h* – photographs of a polished section;  
*d-g, i-l* – micrographs of thin sections and polished sections of an apatite-carbonatite rock with pyrochlore mineralization: *d-g* – in transmitted polarized light, *d, f* – with a single polarizer, *e, g* – with crossed polarizers, *i-l* – in reflected light  
*Pcl* – pyrochlore, *Cal* – calcite, *Ap* – apatite, *Dol* – dolomite, *Hem* – hematite,  
*Qz* – quartz, *Clb-Fe* – ferrocolumbite, *Rt* – rutile

оторочки по идиоморфным кристаллам пирохлора (см. рис. 5, *b*). По породе значительно развиты сульфиды железа в виде пирротина и пирита, отмечаются также гематит и сфалерит.

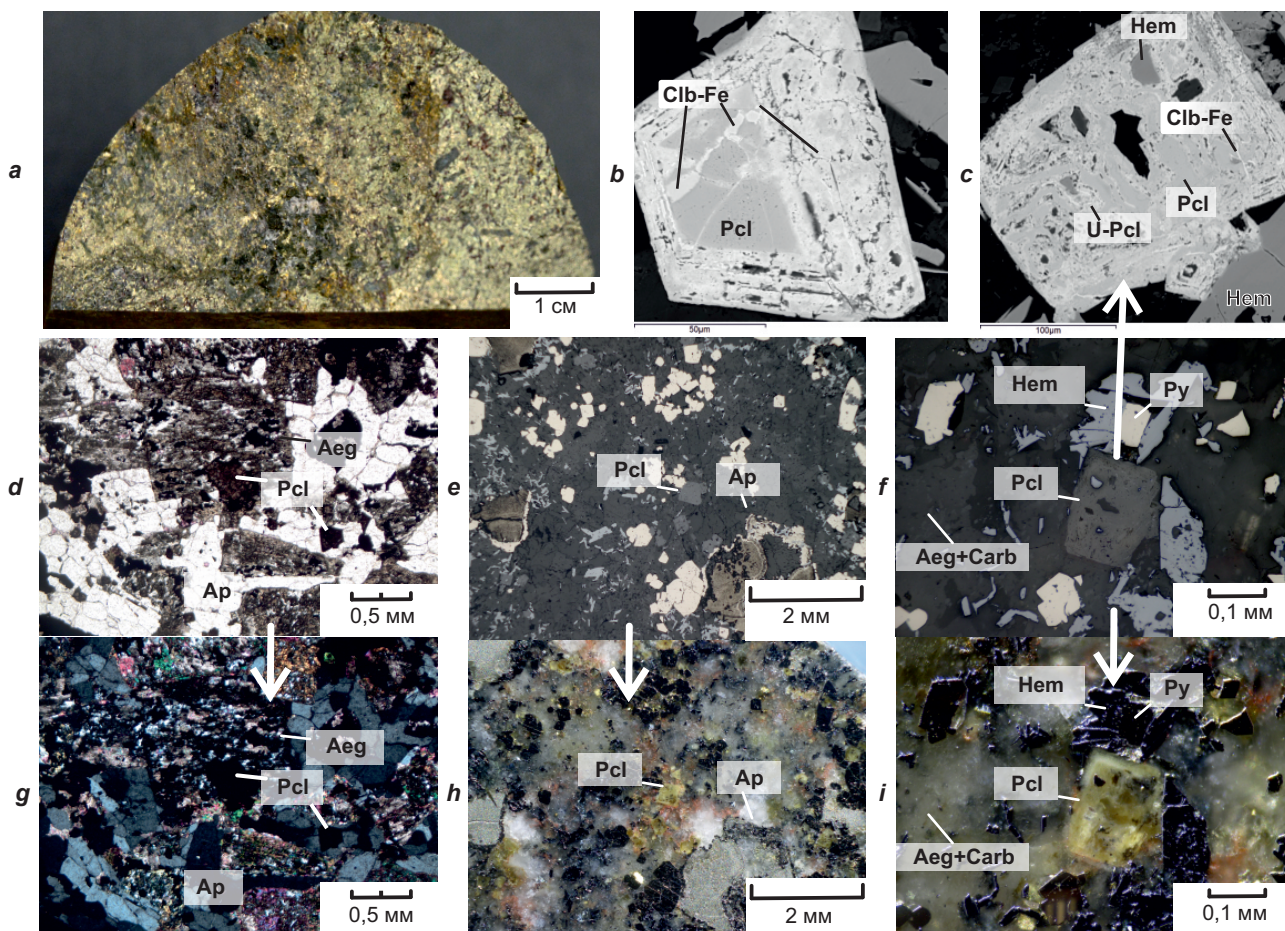
Пирохлор во всех изученных породах по составу соответствует фторкальциопирохлору, точки составов на диаграмме ниобия, титана, тантала в позиции В попадают в поле минералов группы пирохлора, наблюдается тренд в сторону обогащения титан-минералом (рис. 6, *a*). Эмпирическая формула фторкальциопирохлора представлена в следующем виде:



Состав фторкальциопирохлоров схож с составами фторкальциопирохлоров из со-

седнего Белозиминского массива в работе Е.А. Хромовой [9], но в исследованных пирохлорах отмечается больше титана и железа в В-позиции из-за примесей FeO до 3,7% и TiO<sub>2</sub> до 7 масс. % (см. рис. 6, *b*).

Пирохлоры, вероятно, первично-флюидно-магматического происхождения, по составу соответствующие фторкальциопирохлорам, имеют выдержанный состав по катионам в позиции А (отсутствующей или незначительной вакансии в позиции А) (см. рис. 6, *c*). Пирохлоры поздние гидротермального происхождения (или слишком измененные) характеризуются существенной вакансией в позиции А и нестехиометрическим соотношением натрия



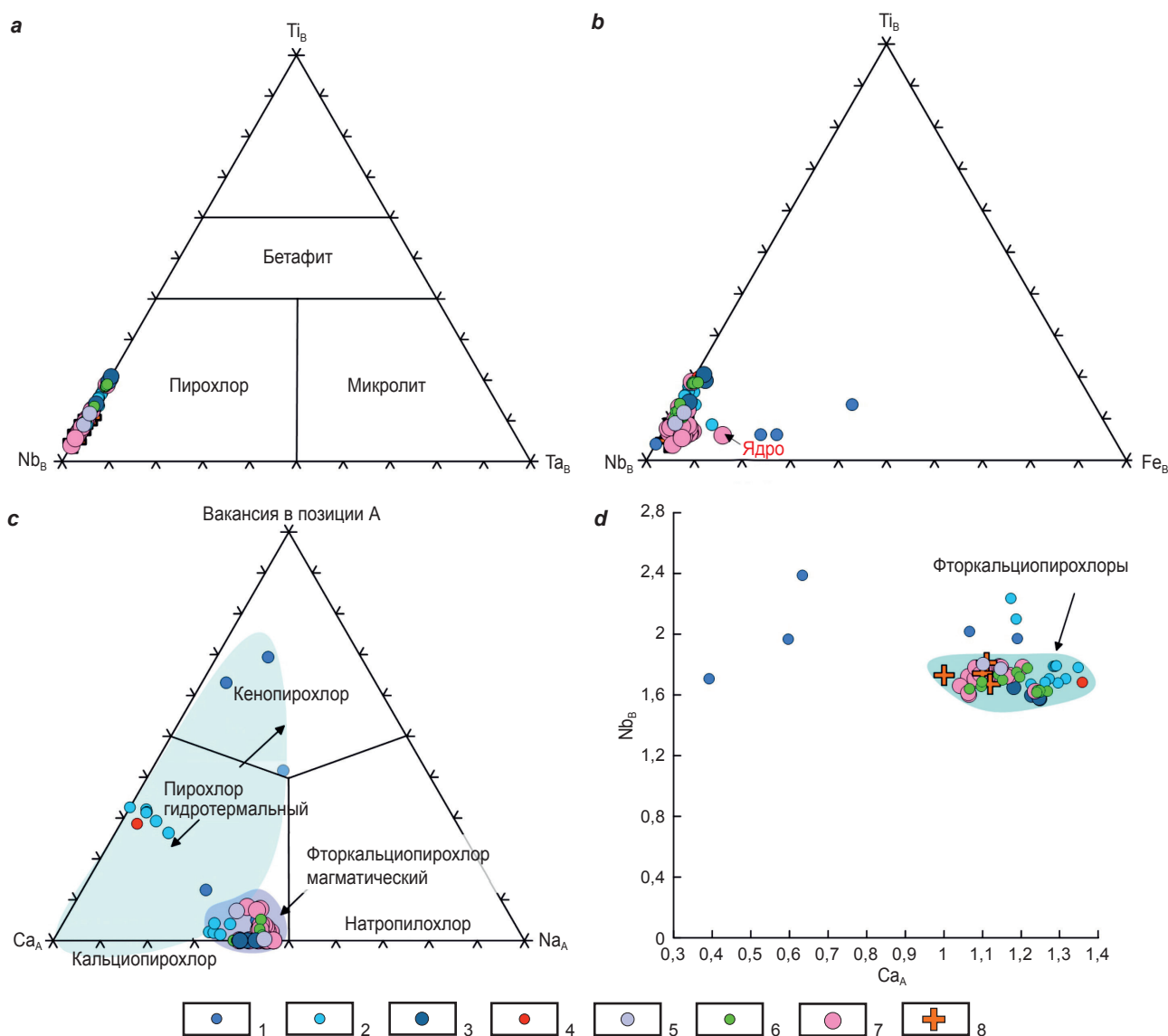
**Рис. 5. Рудная карбонат-апатит-эгирин-сульфидная порода (образец БТГ-18):**  
 a – фотография образца; b, c – микрофотографии в обратно-рассеянных электронах;  
 d, g – микрофотографии шлифа в проходящем свете: d – при одном поляризаторе,  
 g – при скрещенных поляризаторах; e, f, h, i – микрофотографии анишлифа:  
 e, f – в отраженном свете, h, i – при боковом освещении  
 Pcl – пирохлор; U-Pcl – уранпирохлор; Aeg+Carb – эгирин и карбонат; Ap – апатит;  
 Dol – доломит; Hem – гематит; Clb-Fe – ферроколумбит; Py – пирит  
**Fig. 5. Carbonate-apatite-aegirine-sulfide ore rock (sample BTG-18):**  
 a – photograph of the sample; b, c – micrographs in back scattered electrons;  
 d, g – micrographs of a thin section in transmitted light: d – with a single polarizer,  
 g – with crossed polarizers; e, f, h, i – microraphs of a polished section:  
 e, f – in reflected light, h, i – with side illumination  
 Pcl – pyrochlore; U-Pcl – uraniumpyrochlore; Aeg+Carb – aegirine and carbonate; Ap – apatite;  
 Dol – dolomite; Hem – hematite; Clb-Fe – ferrocolumbite; Py – pyrite

и кальция в позиции А, отвечающим неидеализированным составам фторкальциопирохлоров. Стехиометрия состава минералов пирохлора, не соответствующая идеализированной, обусловлена низким содержанием натрия и слишком высоким содержанием кальция в позиции А (см. рис. 6, c), или слишком высоким содержанием ниобия и железа в позиции В (см. рис. 6, b, d), или ошибкой анализа.

Во фторкальциопирохлорах обнаружена примесь SrO до 1,8 масс. %. При этом составы пирохлоров, отвечающие составам фторкальциопирохлоров, из, вероятно, первично-флю-

идно-магматических апатит-пирохлоровых и апатит-слюдистых пород, характеризуются выдержанными значениями SrO в пределах от 0,5 до 1,7 масс. %. Значительный разброс значений по SrO наблюдается в рудах с новообразованным (или измененным) пирохлором (в кальцитовых карбонатитах и метасоматитах).

Среди пирохлоров в образце карбонат-апатит-эгирин-сульфидной породы был обнаружен урансодержащий пирохлор (UO<sub>2</sub> до 1,6 масс. %) с зонами развития уранпирохлора (гаттчетолита) с содержаниями UO<sub>2</sub> – 6,4 масс. % и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,9 масс. % (см. рис. 5, c).



**Рис. 6. Состав пирохлоров:**

*a* – классификационная диаграмма для минералов группы пирохлора Nb, Ti, Ta в позиции B по источнику [2];  
*b* – Nb, Fe, Ti в позиции B в формульных единицах; *c* – классификационная диаграмма для пирохлоров Na, Ca – в позиции A, вакансия в позиции A по источнику [10] (голубым цветом обозначено поле гидротермальных пирохлоров, сиреневым – магматических пирохлоров); *d* – бинарная диаграмма Nb в позиции B и Ca в позиции A  
1 – БТГ-50 – кальцит-карбонатит; 2 – БТГ-18 – карбонат-апатит-эгирин-сульфидная порода;  
3 – БТГ-74 – кальцит-полевошпатовая порода; 4–6 – БТГ-76, БТГ-23, БТГ-15/2 – апатит-слюдистая порода;  
7 – БТГ-8/21 – апатит-пирохлоровая руда; 8 – составы фторкальциопирохлоров из работы [9]

**Fig. 6. Pyrochlore composition:**

*a* – classification diagram for pyrochlore group minerals Nb, Ti, Ta in B-site according to source [2];  
*b* – Nb, Fe, Ti in B-site in formula units; *c* – classification diagram for pyrochlores Na, Ca – in A-site, A-site vacancy according to source [10] (the field of hydrothermal pyrochlores is marked in blue, the field of magmatic pyrochlores is marked in purple); *d* – binary diagram Nb in B-site and Ca in A-site;  
1 – БТГ-50 – calcite carbonatite; 2 – БТГ-18 – carbonate-apatite-aegirine-sulfide rock;  
3 – БТГ-74 – calcite-feldspar rock; 4–6 – БТГ-76, БТГ-23, БТГ-15/2 – apatite-mica rock;  
7 – БТГ-8/21 – apatite-pyrochlore ore; 8 – fluorocalciopyrochlore compositions from work [9]

Ферроколумбит является второстепенным рудным минералом ниобия Большетагинского месторождения. Ферроколумбит наблюдается в виде идиоморфных пористых зерен в апатит-слюдистых породах, в виде полных и частичных ячеистых псевдоморфоз – по

кристаллам пирохлора (см. рис. 4, *л*), образует оторочки по кристаллам пирохлора (см. рис. 5, *б*), а также в виде аллотриоморфных и игольчато-пластинчатых агрегатов среди кальцитовых карбонатитов. Состав ферроколумбита очень непостоянен и характеризуется



следующими вариациями составов (масс. %):  $Nb_2O_5$  (58,88–68,55), FeO (12,13–19,98), MnO (0,84–7,22),  $TiO_2$  (3,27–14,26).

Среди вторичных рудных пород ниобиевые минералы представлены (содержание  $Nb_2O_5$ , масс. %) ниобийсодержащим рутилом (до 7), ильменорутилом (до 25), ниобийсодержащим гематитом (до 7,4), новообразованным пироксеном и ферроколумбитом. Также продуктами преобразования пироксена являются оксиды ниобия, железа и титана с очень непостоянным составом. Максимально приближен к этому составу минерал дмитрийварламовит с составом [11] (масс. %):  $Nb_2O_5$  (40,08), FeO (20,77),  $TiO_2$  (37,72), MnO (0,11),  $V_2O_3$  (0,89). Однако состав исследуемого минерала несколько отличается, что, скорее всего, связано с явлениями изоморфизма (масс. %):  $Nb_2O_5$  (43,43), FeO (18,44),  $TiO_2$  (31,48),  $V_2O_3$  (2,29).

В работах предшественников отмечалось, что основное оруденение Большешагнинского массива связано с «микроклинитовыми» пироксеновыми рудами и «слюдитами», являющимися производными метасоматическими образованиями по первичным ультраосновным щелочным и средним умереннощелочным породам<sup>2</sup> [7, 12]. При петрографических исследованиях в работе В.С. Пикаловой<sup>2</sup> выявлено, что «слюдиты» (апатит-биотитовые метасоматиты) образовались при замещении ийолитов, а «микроклиниты» (доломит-анкерит-кальцит-микроклиновые породы) развиты, предположительно, по сиенитам, при этом не указан первичный источник рудного компонента – ниобия, предполагается метасоматический генезис пироксена. В этой работе<sup>2</sup> отмечено, что состав пироксенов в «микроклинитах» и «слюдитах» похож, что говорит об едином этапе рудообразования. Однако при проведении петрографических работ нами установлено, что рудные апатит-пироксеновые и апатит-слюдистые породы, являющиеся первичными рудами, вероятнее всего имеют раннемагматически-флюидную природу.

Пространственно и генетически ассоциированные с карбонатами ультраосновных щелочных комплексов силикатно-фосфатные породы – фоскориты и глиммериты. Глиммериты – это породы, состоящие в основном ( $\geq 75$  об. %) из слюды (тетраферрофлогопита или биотита), апатита и карбонатных минералов, может также присутствовать амфибол [13, 14]. Предполагается метасоматический (более общепринятый)

[14, 15] или магматический [13, 16] генезис глиммеритов. Пример образования флогопитовых метасоматитов (флогопититы, биотититы или глиммериты) [17, 18] по пироксенитам из-за воздействия карбонатитовой расплава наблюдается в комплексе пород Якупиранга в Бразилии [15]. При этом отмечается реакционная зона между резко различающимися по составу породами и смена типичных скарновых («антискарновых») ассоциаций (оливин, флогопит, кальцит, титанит, амфибол) в зоне контакта пород. Также глиммериты являются основной рудой в массивах Сокли и Сийлиньярви в Финляндии, с которыми связаны промышленные запасы фосфатного сырья [13]. Фоскориты – это породы, состоящие из апатита, магнетита и силикатных минералов (оливин и/или пироксен, и/или флогопит) [19], по некоторым моделям образование таких пород связано с прямой кристаллизацией из фоскоритовой расплава или с фракционной кристаллизацией из фосфатной расплава, или ликвацией из карбонатитовой расплава [19, 20]. Апатит-слюдистые породы и апатититы из Большешагнинского месторождения могут быть генетически связаны с фоскоритами и глиммеритами, отличающиеся от них другим способом эволюции щелочно-фосфатного раствора-расплава, значительно насыщенного флюидами. Это подтверждается в наблюдаемых морфологических и оптических свойствах минералов, их текстурно-структурных взаимоотношениях минеральных парагенезисов и ассоциаций в рудах. Апатит-слюдистые породы не образовались из измененных ультраосновных щелочных пород. Пироксен в апатит-слюдистых породах наблюдается в виде крупных идиоморфных и мелких идиоморфных зерен, образующих вкрапленность и отдельные скопления, отмечается тесный парагенезис пироксена и апатита. При этом пироксен в калиевом полевошпате не обнаружен. Калиевый полевошпат в апатит-слюдистых породах и в апатит-пироксеновых рудах образует «шлиры» – мелкокристаллические агрегаты округлой формы, при этом метасоматической реакционной каймы и калишпатизации слюды не наблюдается. Контакт пород апатит-слюдистых пород и калиевополевошпатовых пород – ровный, без реакционных каемок.

Основные руды месторождения («микроклинитовые» и «биотит-микроклинитовые», «биотититы», относимые к глиммеритам),



вероятно, образовались по исходным калиевошпатовым метасоматитам вследствие воздействия карбонатно-фосфатного раствора-расплава с существенной ролью HF, PO<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> во флюиде, концентрирующего ниобий. Это подтверждается тем, что рудные «микроклиниты» характеризуются неоднородным распределением рудного компонента, образующего чаще прожилковые и прожилково-пятнистые текстуры руд, при этом калиевой полевой шпат брекчирован, перекристаллизован и корродирован (растворен). Из экспериментальной работы [21], в которой было проведено плавление в системах такого рода при 800 °С, установлено, что при воздействии карбонатного расплава доломитового состава на калиевый полевой шпат образуется флогопит и кальцит, при этом пироклор и ниобиевые фазы кристаллизуются вдоль метасоматического контакта рядом с флогопитом между калиевым полевым шпатом и карбонатом (или между глиммеритом и карбонатитом) [21]. В этой работе [21] была предложена модель образования рудных глиммеритов, связанных с воздействием карбонатного расплава на вмещающие калиевошпатовые метасоматиты. Эта модель может объяснить образование рудных метасоматитов калиевополевошпатовых, слюдисто-полевошпатовых и слюдистых пород Большетагнинского месторождения.

Апатит-пироклоровые руды из Чуктуконского месторождения карбонатитов (Чадобецкое поднятие, окраина Сибирской платформы) сходны с подобными рудами из Большетагнинского месторождения [22]. Полученные данные могут указать на важное рудогенерирующее значение фракционирования карбонатитовой системы с обособлением щелочной фосфатно-редкометалльной фазы [22], содержащей значительные повышенные концентрации ниобия по сравнению с вмещающими метасоматитами и карбонатитами.

Явление несмесимости в фосфатно-силикатных и фосфатно-алюмосиликатных системах давно изучено и подтверждено экспериментально [23, 24]. Эти эксперименты показали область широкой несмесимости в силикатном и фосфатном расплаве и позволяют предполагать о ликвационной природе генезиса ряда апатитовых месторождений, связанных с ультраосновными щелочными породами, например, апатит-нефелиновые руды Хибинского массива [24]. Из экспериментальной работы [24] установлено, что в «сухой» системе соста-

ва Ab – Di – NaPO<sub>3</sub> – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ниобий и тантал концентрируются преимущественно в фосфатной фазе, а не в силикатной, поэтому можно предполагать, что образование пироклора возможно в фосфатной фазе в системах такого рода. Из экспериментальных исследований ниобийсодержащих гаплоглокарбонатитов установлено, что пироклор может быть начальной кристаллизующейся фазой в широком диапазоне давлений и температур в пироклоровых апатититах [25–27]. Например, Роджер Митчелл в своей работе [27] показал, что в системе CaCO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-(Ca, Na)Nb<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-F, пироклор является первоначальной ликвидусной фазой, когда содержание фтора в расплаве превышает 1 масс. % при температурах ≥900 °С, понижение концентраций фтора и температуры ведет к образованию луешитовой фазы.

В работе<sup>2</sup> указывается, что магматические кальцитовые карбонатиты Большетагнинского массива характеризуются очень низким содержанием Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (сотые, редко десятые доли масс. %), и рудных тел с промышленным оруденением в них не выявлено. Среди исследованных руд помимо апатит-слюдистых и апатит-пироклоровых пород нами были обнаружены рудные кальцитовые карбонатиты с разным содержанием ниобия (от бортовых значений до богатых содержаний) и калиево-полевошпатово-карбонатные породы (содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ~ 0,5 масс. %).

Пироклор в рудах наблюдается в виде идиоморфных вкрапленников в апатит-пироклоровых породах, идиоморфных зерен и скоплений зерен округлой формы среди апатит-слюдистых пород, а также в виде идиоморфных единичных зерен среди кальцитовых карбонатитов. Вторичные ниобиевые руды, вероятнее всего, образовались при изменении первичных апатит-слюдистых пород, что подтверждается в уменьшении содержания ниобия в измененных апатит-слюдистых породах и в различных многочисленных оксидных минеральных формах нахождения ниобия, образующего наложенное оруденение по другим породам массива. Вторичные руды связаны с новообразованным пироклором и с продуктами изменения первоначального пироклора, отложенными по измененным породам массива вследствие гидротермальных и метасоматических процессов с существенной ролью привноса железа. Вторичная наложенная минерализация представлена ферроколумбитом, который мог псевдоморфно полно-



стью<sup>2</sup> или частично заместить пирохлор, ильменорутилом, ниобийсодержащим рутилом и ниобийсодержащим гематитом.

### Заключение

В результате проведенного исследования сделан вывод, что ниобиевое оруденение в Большешагнинском месторождении связано не только с пирохлор-апатитовыми, калишпатовыми метасоматитами и апатит-слюдистыми породами (что выявлено предшественниками), но также обнаружено в кальцитовых карбонатитах и в других различных метасоматитах.

Установлено, что первичные ниобиевые руды связаны с апатит-слюдистыми и апатит-пирохлоровыми породами. Ключевым первичным минералом – концентратором ниобия в этих породах – является фторкальциопирохлор, отмечается также ферроколумбит. При этом пирохлор существенно ассоциирует с апатитом. Первичные ниобиевые руды, в отличие от вторичных руд, характеризуются низкой степенью метасоматических и постмагматических изменений, что обусловило нахождение ниобия в новых минеральных формах и, как следствие, понижение концентраций ниобия.

Неизменные фторкальциопирохлоры из апатитит-пирохлоровых, апатит-слюдистых пород и кальцит-полевошпатовой породы характеризуются выдержанным составом по CaO, Na<sub>2</sub>O и SrO. Более измененные, гидратированные разности (по вакансиям в позиции А) и составы пирохлоров, не отвечающие составу фторкальциопирохлора, характеры более для метасоматических пород (БТГ-18) и каль-

цитовых карбонатитов (БТГ-50) с наложенной пирохлоровой минерализацией, что отражает разную степень флюидной переработки этих пирохлоров.

Интенсивные постмагматические процессы существенно повлияли на перераспределение ниобия и его переотложение в новых геохимических условиях, формируя вторичные рудные залежи. В этих метасоматических образованиях ниобий содержится в виде крупного новообразованного фторкальциопирохлора, обогащенного значительно ураном и танталом. В кальцитовых карбонатитах оруденение имеет наложенный прожилково-вкрапленный, прожилковый характер. Также выявлено, что руды массива претерпели многофазное полистадийное преобразование, вторичное ниобиевое оруденение связано с продуктами изменения пирохлора – новообразованным ферроколумбитом, ниобийсодержащим рутилом, ильменорутилом и ниобийсодержащим гематитом. Гидротермальное преобразование руд на заключительных этапах завершило многостадийную историю формирования ниобиевого оруденения. Данные вторичные руды могут представлять интерес как комплексное сырье на ниобий, титан и железо. Первичные типы руд (апатитит-пирохлоровые и апатит-слюдистые породы) также могут представлять промышленный интерес на фосфатное сырье. Полученные новые данные могут учитываться при построении схемы отработки рудных залежей для полного извлечения рудного компонента и для разработки схемы обогащения новых комплексных типов руд из месторождения.

### Список источников

1. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // *The Canadian Mineralogist*. 2010. Vol. 48. Iss. 3. P. 673–698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673>.
2. Hogarth D.D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group // *American Mineralogist*. 1977. Vol. 62. P. 403–410.
3. Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Белоусова Е.Б., Пикалова В.С., Быховский Л.З. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2020. № 4–5. С. 8–15. EDN: AOUUJQ.
4. Быховский Л.З., Потанин С.Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. М.: РИС ВИМС, 2009. 156 с. EDN: QKJAKT.
5. Фролов А.А. Структура и оруденение карбонатитовых массивов. М.: Недра, 1975. 160 с.
6. Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Savelyeva V.B., Kotov A.B., Danilova Y.V., Bazarova E.P., et al. Timing of carbonatite ultramafic complexes of the Eastern Sayan Alkaline Province, Siberia: U–Pb (ID–TIMS) Geochronology of Ca–Fe Garnets // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Iss. 8. P. 1086. <https://doi.org/10.3390/min13081086>.
7. Азарнова Л.А., Темнов А.В., Чистякова Н.И., Наумова И.С. Калипирохлор из зоны окисления ниобиевых руд Большешагнинского месторождения // *Разведка и охрана недр*. 2010. № 3. С. 34–37. EDN: MSREBH.
8. Пожарицкая Л.К., Вейс Б.Т., Квитко Т.Д., Нечелюстов Г.Н., Чернышева Е.А. Большешагнинское месторождение ниобия // *Современные проблемы сырьевой базы редких металлов России (1956–2006): Минеральное сырье*. М.: ВИМС, 2006. № 18. С. 119–135.



9. Хромова Е.А., Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В., Избродин И.А. Особенности эволюции состава минералов группы пирохлора в карбонатитах Белозиминского массива (Восточный Саян) // Записки Российского минералогического общества. 2017. Т. 146. №1. С. 84–102. EDN: YHZFML.
10. Ma R.L., Chen W.T., Tang Y.W. Magmatic and hydrothermal controls on diverse Nb mineralization associated with carbonatite-alkaline complexes in the southern Qinling orogenic belt, Central China // *American Mineralogist*. 2024. Vol. 109. Iss. 3. P. 574–590.
11. Udoratina O.V., Panikorovskii T.L., Chukanov N.V., Voronin M.V., Lutoev V.P., Agakhanov A.A., et al. Dmitryvarlamovite,  $Ti_2(Fe^{3+}Nb)O_8$ , a new columbite-supergroup mineral related to the wolframite group // *Mineralogical Magazine*. 2024. Vol. 88. Iss. 2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.95>.
12. Базарова Е.П., Савельева В.Б., Данилова Ю.В. Геохимия ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов Большетагнинского массива (Восточный Саян) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 31–36. <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.006>. EDN: LAZTKW.
13. O'Brien H., Heilimo E., Heino P. The archaic Siilinjärvi carbonatite complex // *Mineral deposits of Finland*. Amsterdam: Elsevier, 2015. P. 327–343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00013-3>.
14. Silva D., Daczko N., Piazzolo S., Raimondo T. Glimmerite: A product of melt-rock interaction within a crustal-scale high-strain zone // *Gondwana Research*. 2022. Vol. 105. P. 160–184. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.09.005>.
15. Chmyz L., Azzone R.G., Ruberti E., Guarino V. Wall rock assimilation in carbonatite magmas: Textural, mineral and whole-rock geochemical signatures in the Jacupiranga complex, Brazil // *Geochemistry*. 2025. Vol. 85. Iss. 1. P. 126218. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126218>.
16. Karvinen S., Heinonen A., Beier C., Jönes N. The composition of apatite in the Archean Siilinjärvi glimmerite-carbonatite complex in Eastern Finland // *Bulletin of the geological society of Finland*. 2024. Vol. 96. Iss. 1. P. 5–34. <https://doi.org/10.17741/bgsf/96.1.001>.
17. Becker H., Wenzel T., Volker F. Geochemistry of glimmerite veins in peridotites from Lower Austria – implications for the origin of K-rich magmas in collision zones // *Journal of Petrology*. 1999. Vol. 40. Iss. 2. P. 315–338. <https://doi.org/10.1093/petrology/40.2.315>.
18. Anenburg M., Walters J. B. Metasomatic ijolite, glimmerite, silicocarbonatite, and antiskarn formation: carbonatite and silicate phase equilibria in the system  $Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-O_2-CO_2$  // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2024. Vol. 179. Iss. 5. P. 40. [https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm\\_source%3Dresearchgate.net%26utm\\_medium%3Darticle](https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle).
19. Krasnova N.I., Balaganskaya E.G. Garcia D. Kovdor – classic phoscorites and carbonatites // *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. Mineralogical Society Series. Iss. 10. / ed. F. Wall, A.N. Zaitsev. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 2004, P. 95–127.
20. Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Mineralogy of phoscorites of the Arbarastakh complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia) // *Minerals*. 2021. Vol. 11. Iss. 6. P. 556. <https://doi.org/10.3390/min11060556>.
21. Williams-Jones A.E., Vasyukova O.V., Kostyuk A.V. Niobium ore genesis in a capsule // *Geology*. 2024. Vol. 52. Iss. 7. P. 560–564. <https://doi.org/10.1130/G52169.1>.
22. Лапин А.В., Куликова И.М., Левченко Е.Н. О перспективном типе апатит-пирохлоровых руд в породах экзо-контактового ореола карбонатитов // *Разведка и охрана недр*. 2016. № 11. С. 36–41. EDN: XIKZPX.
23. Когарко Л.Н., Кригман Л.Д., Петрова Е.Н., Соловова И.П. Фазовые равновесия в системе фторапатит – нефелин – диопсид в связи с генезисом апатитовых месторождений Хибин. Геохимия. 1977. № 1. С. 42-55.
24. Сук Н.И. Жидкостная несмесимость в щелочных магматических системах. М.: Книжный дом Университет, 2017. 238 с.
25. Mitchell R.H., Wahl R., Cohen A. Mineralogy and genesis of pyrochlore apatite from the good hope carbonatite, Ontario: A potential niobium deposit // *Mineralogical Magazine*. 2019. Vol. 84. Iss. 1. P. 81–91. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.64>.
26. Kjarsgaard B.A., Mitchell R.H. Solubility of Ta in the system  $CaCO_3-Ca(OH)_2-NaTaO_3-NaNbO_3 \pm F$  at 0.1 GPa: Implications for the crystallization of pyrochlore group minerals in carbonatites // *The Canadian Mineralogist*. 2008. Vol. 46. Iss. 4. P. 981–990. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.981>.
27. Mitchell R.H. Mineralogical and experimental constraints on the origins of niobium mineralization in carbonatites // *Rare element geochemistry and mineral deposits*. Geological Association of Canada: Short course notes 17. 2004. P. 201–215.

### References

1. Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *The Canadian Mineralogist*. 2010;48(3):673-698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.673>.
2. Hogarth D.D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *American Mineralogist*. 1977;62:403-410.
3. Nechaev A.V., Polyakov E.G., Belousova E.B., Pikalova V.S., Bykhovskiy L.Z. Mineral resources of niobium in Russia: priorities of development. *Mineral resources of Russia. Economics & Management*. 2020;4-5:8-15. (In Russ.). EDN: AOUUJQ.
4. Bykhovskiy L.Z., Potanin S.D. *Geological and industrial types of rare metal deposits*. Moscow: Editorial and Publishing Sector of the All-Russian Research Institute of Mineral Resources; 2009, 156 p. (In Russ.). EDN: QKJAKT.
5. Frolov A.A. *Structure and mineralization of carbonatite massifs*. Moscow: Nedra; 1975, 160 p. (In Russ.).



6. Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Savelyeva V.B., Kotov A.B., Danilova Y.V., Bazarova E.P., et al. Timing of carbonatite ultramafic complexes of the Eastern Sayan Alkaline Province, Siberia: U–Pb (ID–TIMS) Geochronology of Ca–Fe Garnets. *Minerals*. 2023;13(8):1086. <https://doi.org/10.3390/min13081086>.
7. Azarnova L.A., Temnov A.V., Chistyakova N.I., Naumova I.S. Kalipyrochlore from weathered ore at Bolshetagninskoe deposit. *Prospect and protection of mineral resources*. 2010;3:34–37. (In Russ.). EDN: MSREBH.
8. Pozharitskaia L.K., Veis B.T., Kvitko T.D., Nechelyustov G.N., Chernysheva E.A. Bolshetagninskoye niobium deposit. In: Current problems of the raw material base of rare metals in Russia (1956–2006): Mineral raw materials. Moscow: All-Russian Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky; 2006;18:119–135. (In Russ.).
9. Khromova E.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Izbrodin I.A. Evolution of pyrochlore group mineral composition in carbonatites of the Belaya Zima massif (Eastern Sayan). *Zapiski RMO. Proceedings of the Russian mineralogical society*. 2017;146(1):84–102. (In Russ.). EDN: YHZFML.
10. Ma R.L., Chen W.T., Tang Y.W. Magmatic and hydrothermal controls on diverse Nb mineralization associated with carbonatite-alkaline complexes in the southern Qinling orogenic belt, Central China. *American Mineralogist*. 2024;109(3):574–590.
11. Udoratina O.V., Panikorovskii T.L., Chukanov N.V., Voronin M.V., Lutoev V.P., Agakhanov A.A., et al. Dmitryvarlamovite,  $Ti_2(Fe^3+ Nb)O_8$ , a new columbite-supergroup mineral related to the wolframite group. *Mineralogical Magazine*. 2024;88(2):147–154. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.95>.
12. Bazarova E.P., Savelyeva V.B., Danilova Yu.V. Geochemistry of ultramafic-alkaline rocks and carbonatites of the Bol'shetagninsky massif (Eastern Sayan). *Proceedings of the Fersman scientific session of the Geological Institute of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;18:31–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.006>. EDN: LAZTKW.
13. O'Brien H., Heilimo E., Heino P. The archaic Siilinjärvi carbonatite complex. In: *Mineral deposits of Finland*. Amsterdam: Elsevier; 2015, 327–343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410438-9.00013-3>.
14. Silva D., Daczko N., Piazzolo S., Raimondo T. Glimmerite: A product of melt-rock interaction within a crustal-scale high-strain zone. *Gondwana Research*. 2022;105:160–184.
15. Chmyz L., Azzone R.G., Ruberti E., Guarino V. Wall rock assimilation in carbonatite magmas: Textural, mineral and whole-rock geochemical signatures in the Jacupiranga complex, Brazil. *Geochemistry*. 2025;85(1):126218. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126218>.
16. Karvinen S., Heinonen A., Beier C., Jönes N. The composition of apatite in the Archean Siilinjärvi glimmerite-carbonatite complex in Eastern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 2024;96(1):5–34. <https://doi.org/10.17741/bgsf/96.1.001>.
17. Becker H., Wenzel T., Volker F. Geochemistry of glimmerite veins in peridotites from Lower Austria – implications for the origin of K-rich magmas in collision zones. *Journal of Petrology*. 1999;40(2):315–338. <https://doi.org/10.1093/petrology/40.2.315>.
18. Anenburg M., Walters J. B. Metasomatic ijolite, glimmerite, silicocarbonatite, and antiskarn formation: carbonatite and silicate phase equilibria in the system  $Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-O_2-CO_2$ . *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2024;179(5):40. [https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm\\_source%3Dresearchgate.net%26utm\\_medium%3Darticle](https://doi.org/10.1007/s00410-024-02109-0?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle).
19. Krasnova N.I., Balaganskaya E.G., Garcia D., Kovdor – classic phoscorites. In: Wall F., Zaitsev A.N. (ed.). *Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: The key example of the Kola alkaline province*. Mineralogical Society Series. Iss. 10. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland; 2004, p. 95–127.
20. Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Mineralogy of phoscorites of the Arbarastakh complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia). *Minerals*. 2021;11(6):556. <https://doi.org/10.3390/min11060556>.
21. Williams-Jones A.E., Vasyukova O.V., Kostyuk A.V. Niobium ore genesis in a capsule. *Geology*. 2024;52(7):560–564. <https://doi.org/10.1130/G52169.1>.
22. Lapin A.V., Kulikova I.M., Levchenko E.N. About the prospects of apatite-pyrochlore type ore in the rocks excontact halo of carbonatites. *Prospect and protection of mineral resources*. 2016;11:36–41. (In Russ.). EDN: XIKZPX.
23. Kogarko L.N., Krigman L.D., Petrova E.N., Solovova I.P. Phase equilibria in the fluorapatite–nepheline–diopside system in relation to the genesis of the Khibiny apatite deposits. *Geochemistry International*. 1977, № 1, p. 42–55. (In Russ.).
24. Suk N.I. *Liquid immiscibility in alkaline magmatic systems*. Moscow: Knizhnii Dom Universitet; 2017, 238 p. (In Russ.).
25. Mitchell R.H., Wahl R., Cohen A. Mineralogy and genesis of pyrochlore apatite from the good hope carbonatite, Ontario: A potential niobium deposit. *Mineralogical Magazine*. 2020;84(1):81–91. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.64>.
26. Kjarsgaard B.A. and Mitchell R.H. Solubility of Ta in the system  $CaCO_3-Ca(OH)_2-NaTaO_3-NaNbO_3 \pm F$  at 0.1 GPa: Implications for the crystallization of pyrochlore group minerals in carbonatites. *The Canadian Mineralogist*. 2008;46(4):981–990. <https://doi.org/10.3749/canmin.46.4.981>.
27. Mitchell R.H. Mineralogical and experimental constraints on the origins of niobium mineralization in carbonatites. In: *Rare Element Geochemistry and Mineral Deposits*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 17. 2004:201–215.

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Сукнева Мария Олеговна,**  
инженер-исследователь лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
Лаборант лаборатории палеогеодинамики,  
Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ masha.sukneva@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-4676-3331>

**Maria O. Sukneva,**  
Research Engineer of the Laboratory of Physicochemical Petrology  
and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
Laboratory Assistant of the Laboratory of Paleogeodynamics,  
Institute of the Earth's Crust,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ masha.sukneva@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0005-4676-3331>



**Радомская Татьяна Алесандровна,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
научный сотрудник лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
radomskaya@igc.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6220-9980>

**Tatiana A. Radomskaia,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Researcher of the Laboratory of Physicochemical Petrology and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
radomskaya@igc.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6220-9980>



**Гавриленко Вероника Владимировна,**  
инженер-исследователь лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
i@verf61.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-3402-5746>

**Veronika V. Gavrilenko,**  
Research Engineer of the Laboratory of Physicochemical Petrology  
and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
i@verf61.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-3402-5746>



**Чуешова Анастасия Геннадьевна,**  
младший научный сотрудник лаборатории физико-химической петрологии  
и генетической минералогии,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
trill6521@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1107-3179>  
**Anastasia G. Chueshova,**  
Junior Researcher of the Laboratory of Physicochemical Petrology  
and Genetic Mineralogy,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
trill6521@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1107-3179>

#### **Вклад авторов / Contribution of the authors**

М.О. Сукнева – проведение исследования, визуализация данных, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Т.А. Радомская – получение финансирования, проведение исследования, научное руководство, редактирование рукописи.

В.В. Гавриленко – курирование данных, получение финансирования, проведение исследования, редактирование рукописи.

А.Г. Чуешова – проведение исследования.

Maria O. Sukneva – investigation, visualization, writing – original draft, writing – editing.

Tatiana A. Radomskaia – funding acquisition, investigation, supervision, writing – editing.

Veronika V. Gavrilenko – data curation, funding acquisition, investigation, writing – editing.

Anastasia G. Chueshova – investigation.

#### **Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; одобрена после рецензирования 13.03.2026; принята к публикации 19.03.2026.

The article was submitted 05.03.2026; approved after reviewing 13.03.2026; accepted for publication 19.03.2026.



Научная статья  
УДК 622.3+504.5+912.43  
EDN: UKAGXU  
DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-6



## Пространственно-временное распределение элементов в техногенных почвах Ковыктинского газоконденсатного месторождения

Д.И. Пыжьянов<sup>a,✉</sup>, Г.И. Сарапулова<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

**Резюме.** Цель проведенного исследования заключалась в выявлении характера пространственно-временного распределения тяжелых металлов и мышьяка на территории газоконденсатного месторождения за период 2019–2025 гг. Динамика повышения содержаний по годам для марганца, мышьяка, никеля с превышением ориентировочно допустимых концентраций позволила наглядно оценить зависимость между интенсивностью освоения территории в зоне добычи газа и уровнем негативного воздействия в виде поступления этих элементов в почву. В соответствии с задачами проведен критический анализ всех промзвудов на площадке с позиции потенциального поступления загрязняющих веществ в почвенный слой, получены коэффициенты накопления элементов относительно мировых кларков по Виноградову. Так, обнаружен повышенный коэффициент накопления мышьяка, марганца, никеля ( $K_k \geq 1,5$ ). Геоэкологические процессы техногенеза в районе газоконденсатного месторождения сопровождаются формированием ореолов загрязнения почв, что определено посредством геоинформационных систем технологий. Геохимические показатели почв как индикаторы их состояния отражают высокую функциональность в условиях негативного воздействия при добыче газа и реально оценивают геоэкологическую обстановку на месторождении. Показано, что пространственное распределение марганца, никеля преимущественно связано с технологическими процессами, регулярными производственными работами и сваркой. Превышение же содержаний мышьяка может быть обусловлено наследованием геолого-геохимической особенности Прибайкальской природной территории с повышенным содержанием этого металлоида в составе привозного грунта для планировки территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Таким образом, интеграция геоинформационных систем технологий с результатами геохимических исследований является эффективным инструментом комплексной геоэкологической оценки территории в зоне техногенеза и служит основой для создания эффективного современного объектно-ориентированного мониторинга в зоне газоконденсатного месторождения.

**Ключевые слова:** газоконденсатное месторождение, промплощадка, куст газовых скважин, почва, геохимические параметры, тяжелые металлы, геоинформационная система

**Для цитирования:** Пыжьянов Д.И., Сарапулова Г.И. Пространственно-временное распределение элементов в техногенных почвах Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 72–83. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-6>. EDN: UKAGXU.

### Original article

## Spatiotemporal distribution of elements in technogenic soils of Kovykta gas condensate field

Daniil.I. Pyzhianov<sup>a,✉</sup>, Galina I. Sarapulova<sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of the conducted study was to identify the spatial and temporal distribution of heavy metals and arsenic in a gas condensate field for the period from 2019 to 2025. The annual increase in manganese, arsenic, and nickel concentrations exceeding the estimated permissible concentrations allowed for a clear assessment of the relationship between the intensity of development in the gas production zone and the level of negative impacts from the release of these elements into the soil. In accordance with the objectives, a critical analysis of all production units on the industrial site was conducted to assess the potential for pollutants to enter the soil. The coefficients of element accumulation were obtained relative to the global clarks according to Vinogradov. Thus, arsenic, manganese, and nickel showed an increased accumulation coefficient of  $K_k \geq 1.5$ . Geoecological processes associated with technogenesis in the area of the gas condensate field are accompanied by the formation of soil contamination halos, which was determined using geoinformation system technologies. Geochemical parameters of soils, as indicators of their conditions, reflect high functionality under the adverse impacts of gas production and provide a realistic assessment of the geoecological situation at the field. It is shown that the spatial distribution



of manganese and nickel elements is primarily related to technological processes, regular production works and welding. The excessed contents of arsenic may be due to the inherited geological and geochemical features of the Baikal natural territory with the elevated content of this metalloid in the soil imported for the Kovykta gas condensate field development. Thus, the integration of geoinformation system technologies and geochemical survey results is an effective tool for the comprehensive geoecological assessment of the territory in the technogenic zone and serves as a basis for the development of effective, modern, object-oriented monitoring in the gas condensate field zone.

**Keywords:** gas condensate field, industrial site, gas well cluster, soil, geochemical parameters, heavy metals, geoinformation system

**For citation:** Pyzhianov D.I., Sarapulova G.I. Spatiotemporal distribution of elements in technogenic soils of Kovykta gas condensate field. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):72-83. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-6>. EDN: UKAGXU.

## Введение

Геоэкологическое состояние территории газоконденсатных месторождений находится под влиянием возрастающей активной добычи и связано с проблемой нарушения таежных ландшафтов, рисками загрязнения почв продуктами бурения, подготовкой и транспортировкой газа [1, 2]. При этом происходит механическое разрушение почвы, отрицательное физико-химическое воздействие с фрагментарным или полным уничтожением гумуса и уплотнение верхнего слоя. Химическое воздействие на почвенный покров наблюдается как в результате атмосферных выпадений от промышленных узлов, так и вследствие утечки и потерь технологических жидкостей работающих установок. Это случается также по причине нарушений технологического регламента работы оборудования и аварий. На территориях добычи газа возникает угроза устойчивой и подчас необратимой трансформации природных экосистем, формируется горнопромышленная природно-техногенная система с доминированием техногенной составляющей. Причем границы такого воздействия значительно превышают территорию района непосредственного освоения месторождения [3].

Пространственно-временное распределение элементов загрязнителей, в том числе тяжелых металлов в почвах, характеризуется, как правило, высокой неоднородностью, концентрируясь у источников загрязнения и накапливаясь со временем из-за отсутствия биодеградации. Максимальные концентрации характерны для верхнего гумусового горизонта, загрязнение носит кумулятивный характер, а при длительном техногенном воздействии концентрации тяжелых металлов в почве растут.

В связи с этим прогнозирование масштабов негативного влияния районов газодобычи на почвы является актуальной и необходимой перспективной задачей для выявления наиболее

уязвимых природных компонентов территории под влиянием усиливающегося горнопромышленного техногенеза [4, 5].

Несмотря на ряд работ по изучению геоэкологического состояния территорий в зоне добычи газа, проблема формирования объектно-ориентированного эколого-геохимического мониторинга на территории месторождений, а также перспективы техногенного воздействия на почвы остаются актуальными [6–8].

Необходимо учитывать, что при высоком уровне загрязнения, превышающем емкость почвы к связыванию токсикантов, может произойти накопление загрязняющих веществ в почвенном профиле и их последующая миграция [9–12]. Мировые исследования и мониторинг состояния почв фиксируют опасный мировой тренд повышения концентраций тяжелых металлов, что наиболее остро наблюдается в зоне освоения недр и добычи полезных ископаемых. В результате на этих территориях формируются опасные эндогенные процессы, возникают локальные геохимические аномалии с высоким содержанием токсикантов, происходит формирование глобальной техногенно-измененной геохимической структуры литосферы [13], поэтому разработка новых подходов геоэкологической оценки динамично изменяющихся природных систем в условиях усиливающегося техногенеза является актуальной проблемой [14].

В данной работе основной акцент сделан на исследование пространственно-временной динамики геоэкологического состояния почвенного покрова, который является естественным депо при поступлении всех загрязняющих веществ в процессе работы многих промучлов при добыче газа. Наиболее эффективным и наглядным приемом является использование геоинформационных систем технологий (ГИС-технологий), позволяющим с высокой степенью информативности оценить



изменение состояния территории, в том числе почв, прогнозировать развитие ситуации в условиях техногенеза.

В рамках проводимых нами систематических исследований в зоне техногенеза по теме «Теория и методы геоэкологической оценки экосистем, инженерная защита и прогнозирование состояния техногенно-измененной природной среды» сформулированы следующие цели и задачи настоящей работы.

Цель исследования – с использованием геохимических параметров почв и ГИС-технологий выявить пространственно-временную динамику распределения тяжелых металлов – кобальта, марганца, меди, никеля, свинца, кадмия, цинка (входящих в основной список приоритетных загрязнителей), а также мышьяка – в техногенно-трансформированных почвах на территории газоконденсатного месторождения.

Задачи исследования:

- 1) выявить потенциальные источники техногенного поступления загрязнителей почв на промплощадке месторождения;
- 2) получить количественные параметры геохимического состояния техногенных почв в динамике по годам в период 2023–2026 гг. и ранее (для сравнения) с учетом приоритетного списка загрязнителей;
- 3) получить ГИС-распределение (карты-ореолы) контролируемых элементов в почвах

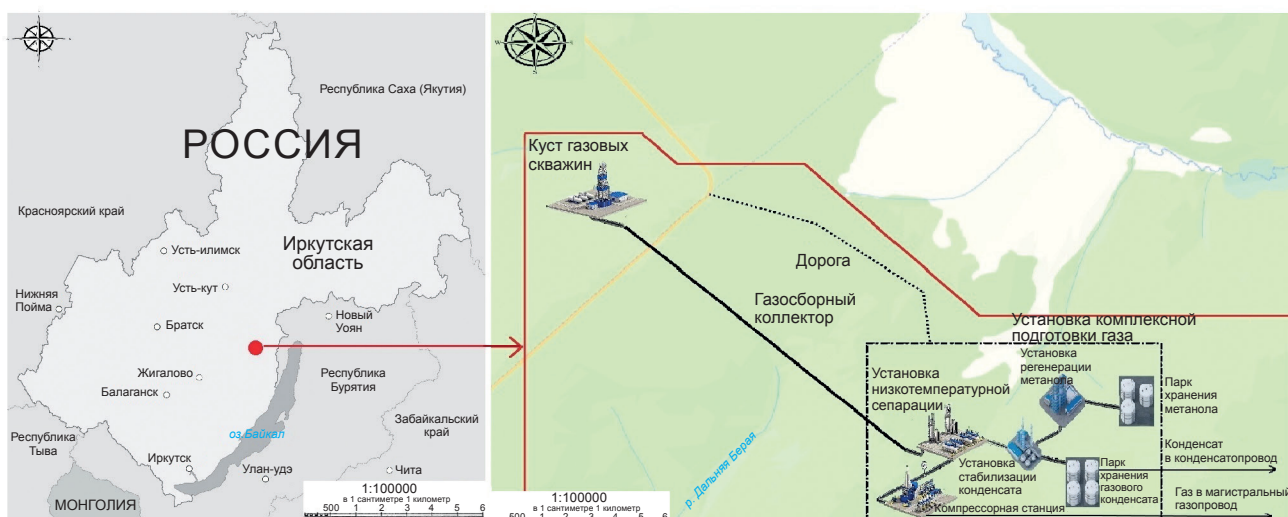
на территории месторождения, выявить геохимические аномалии и ассоциации, а также направления миграции загрязнителей.

## Материалы и методы исследования

**Объект исследования.** В качестве объекта исследования были выбраны техногенные почвы на территории Ковыктинского газоконденсатного месторождения, расположенного на севере Иркутской области. На рис. 1 представлен район расположения газоконденсатного месторождения и промышленные установки на промплощадке, где в течение трех лет проводился отбор почв для исследований.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являлась почва в зоне влияния промышленных объектов (узлов) на промплощадке Ковыктинского газоконденсатного месторождения и ее геохимические параметры, служащие индикаторами экологического состояния.

**Методы исследования.** В работе для решения поставленных задач применялись следующие методы: системный подход, сравнительный и геоэкологический анализ, математическое и ГИС-моделирование. Пробоподготовка проводилась в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017<sup>1</sup>. Элементный химический состав почв валовых содержаний определялся стандартными методами геохимии: атомно-абсорбционной спектроскопией (на



**Рис. 1. Расположение Ковыктинского газоконденсатного месторождения и промышленные установки на промплощадке**

**Fig. 1. Location of the Kovykta gas condensate field and industrial installations at the industrial site**

<sup>1</sup> ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.



сертифицированном оборудовании и рентгенофлуоресцентным анализом с использованием портативного прибора SciAps серии X200-30453.

Значения рН почв получены потенциометрически по ГОСТ 26212-91<sup>2</sup>. Содержание органического углерода – фотометрически по ГОСТ 26213-2021 (п. 6.1)<sup>3</sup>, содержание общего азота – фотометрическим методом по ГОСТ Р 58596-2019 (п. 7.2)<sup>4</sup>. Статистическая обработка данных выполнена в Statistica 10, картосхемы построены в Surfer 23.1.162 с использованием ГИС-приемов<sup>5</sup> [15–17].

### Результаты исследования и их обсуждение

Для реализации хозяйственной деятельности за период эксплуатации Ковыктинского месторождения задействовано более 7,5 тыс. км<sup>2</sup> земель, что при интенсивной добыче газа и негативном воздействии на почвы неизбежно приводит к деградации почв. Однако район добычи расширяется. Суглинистые почвы на территории месторождения сформировались как техноземы, которые распространены по всей промплощадке. Почвогрунты для обустройства и планировки завозились с близлежащих карьеров и заимок в пределах Иркутской области, в частности, из районов Жигаловского и Казачинско-Ленского районов. Аргиллиты и глинистые породы – из местных карьеров Ярактинского месторождения и близлежащих мест.

В соответствии с задачами проведен критический анализ промузлов на площадке с позиции потенциального поступления загрязняющих веществ в почвенный слой.

**Газовые скважины.** Газовые скважины являются критически важным начальным технологическим объектом, определяющим работоспособность и основную эффективность месторождения. В почву при работе скважины попадают буровой шлам, нефтепродукты и конденсат, метанол (как ингибитор гидратообразования), рапа, богатая тяжелыми металлами и солями. Буровые жидкости, которые применя-

ются при бурении, могут также содержать реагенты, такие как полимеры и реологические модификаторы [18, 19].

**Газосборный коллектор.** Газосборный коллектор – это трубопроводная система сбора газа и конденсата. Загрязнителями от протечек могут быть газовый конденсат и углеводороды, метанол, рапа, содержащая в большом количестве тяжелые металлы и соли, просачивающиеся в грунт при коррозии или повреждениях металла [20].

**Установка низкотемпературной сепарации.** Данная технология заключается в отделении жидкости от газа, отделении конденсата и водометанольного раствора путем его охлаждения до -40 °С с помощью турбодетандера, теплообменника, эжектора, дросселя. Утечки приводят к сбросу в почву легких углеводородов, метана, хладагентов, метанола.

**Компрессорная станция.** На станции происходит сжатие газа винтовыми, поршневыми или центробежными компрессорами для поддержания давления в сети и транспортировки газа по магистральному газопроводу. Загрязняющие почву вещества в результате протечки: смазки, масла, газы, конденсаты.

**Установка стабилизации конденсата.** На установке происходит процесс нагрева и ректификации нестабильного конденсата для удаления из него легких фракций углеводородов. Отходы от утечек: сырой конденсат, пропан-бутановая фракция и сточные воды, проникающие в грунт.

**Установка регенерации метанола.** На установке происходит восстановление метанола из богатой смеси посредством нагрева и ректификации для повторного использования с целью предотвращения гидратообразования. Протечки содержат метанол и примеси воды с солями.

**Парк хранения метанола.** Парк хранения метанола представляет собой резервуарный парк с цилиндрическими емкостями на фундаментах. Утечки вызывают просачивание метанола в почву, приводя к токсичному загрязнению территории.

<sup>2</sup> ГОСТ 26212-91. Почвы. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. М.: Изд-во стандартов, 1992. 7 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 58596-2019 (п. 7.2). Почвы. Методы определения общего азота. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с.

<sup>5</sup> Getting to know ArcView GIS: the geographic information system (GIS) for everyone by Environmental Systems Research Institute (Redlands, Calif.). Режим доступа: [https://archive.org/details/isbn\\_9781879102460/page/n9/mode/2up](https://archive.org/details/isbn_9781879102460/page/n9/mode/2up) (дата обращения: 15.11.2025).



*Парк хранения газового конденсата.* Парк хранения газового конденсата – это резервуарный комплекс для легких углеводородов. Основные отходы, поступающие в почву при коррозии или переливах: сырой конденсат, бензиновые фракции.

В почвах исследуемой территории месторождения было выявлено превышение содержания валовых форм марганца – до 1700 мг/кг (предельно допустимые концентрации (ПДК) – 1500 мг/кг), мышьяка – до 11–14,4 мг/кг (ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) – 2 мг/кг), никеля – до 85 мг/кг (ОДК – 40 мг/кг). ОДК мышьяка в почве регулируются ГН 2.1.7.020-94<sup>6</sup> и зависят от физико-химических свойств почвы, включая гранулометрический состав, в т. ч. для суглинков – ОДК мышьяка – 10 мг/кг. Нормирование содержания мышьяка в настоящее время не учитывает формы его нахождения в почвах. Однако при решении вопроса о степени загрязнения почв мышьяком имеет значение то, в какой форме мышьяк накапливается в данном объекте. Токсичность мышьяка зависит от степени окисленности: трехвалентный в 2–3 раза токсичнее, чем пятивалентный, который менее подвижен, прочнее адсорбируется. Определение химических форм мышьяка в почвенных водах показало, что в аэробных почвах он содержится в основном в форме  $As_3O_4^{3-}$ -анионов, в анаэробных –  $AsO_4^{3-}$ . Оксиды мышьяка водорастворимые, а галогенарсенаты, наоборот, гидрофобны. Однако, естественно, эти нюансы не учитываются при оценке уровня загрязнения почвы и не контролируются в рамках экологического контроля.

Значение ключевого параметра состояния почв рН-водной вытяжки составляет от 4,2 до 5,5, что характеризует закисление поверхностного почвенного слоя в зоне промплощадки. Это может приводить к увеличению подвижности тяжелых металлов, поступающих при бурении из недр в виде попутных элементов, и к их иммобилизации в почве.

За период с 2019 по 2025 г. проведен сравнительный временной анализ содержания тяжелых металлов и мышьяка в почвах, обозначенных на картах ГИС-пунктов регулярного пробоотбора (геоэкологический мониторинг –

весна–осень) по всем указанным технологическим участкам (узлам).

Проведена предварительная фоновая оценка содержания химических элементов вне промплощадки на расстоянии 10 км от нее. Кроме того, был рассчитан геохимический фон для почв методом кларков (по А.Е. Ферсману). Значение валового содержания элементов в почве наиболее часто используется в геохимии и техногеохимии. По величине валового содержания элементов оценивают контрастность и емкость геохимических барьеров, определяют формирование аномальных геохимических модулей. Использование кларка позволяет оценивать мощность природной или техногенной аномалии как положительной (при превышении кларка), так и отрицательной (при уровне ниже кларкового).

В нашем случае, по сравнению с кларками почв мира, в изученных почвах на уровне или выше накопления находятся следующие элементы:

– мышьяк, марганец, никель (коэффициент накопления  $K_k \geq 1,5$ );

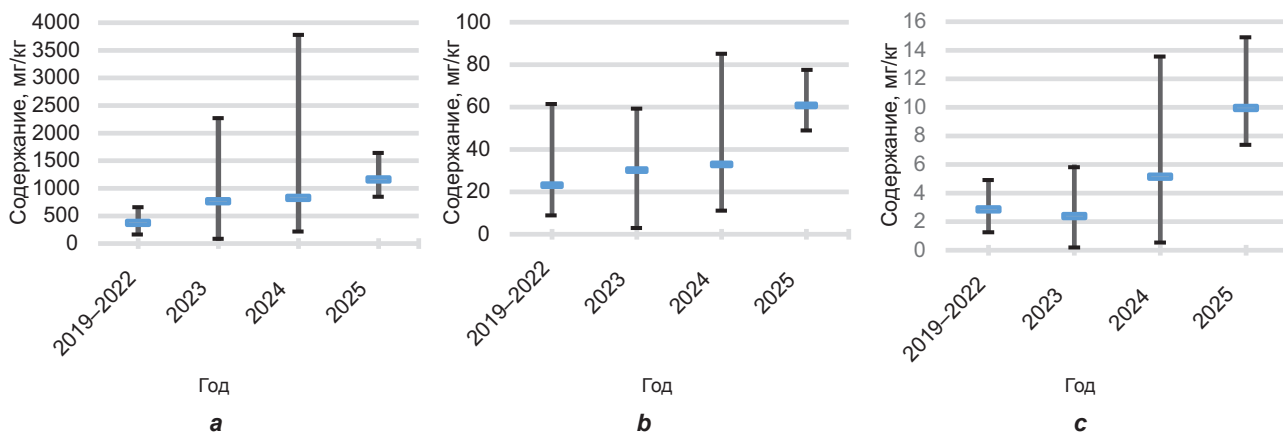
– в ассоциацию околосларковых входят медь, цинк (коэффициент накопления  $K_k = 0,8–1,5$ );

– с дефицитом содержания фиксируются элементы свинца, кобальта (коэффициент накопления  $K_k \leq 0,7$ ). При этом использовались медианные значения для сравнительной геохимической характеристики относительно мировых кларков почв мира по А.П. Виноградову – As – 5 мг/кг, Ni – 40 мг/кг, Mn – 850 мг/кг.

Выявлена временная динамика повышения содержания для трех элементов марганца, мышьяка, никеля с начала функционирования месторождения по годам. Получены гистограммы (усы), позволяющие наглядно оценить зависимости между интенсивностью освоения территории в зоне добычи газа и уровнем негативного воздействия в виде поступления этих элементов в почву от промышленных узлов (рис. 2).

Для выяснения различного характера наблюдаемого распределения контролируемых элементов в почвах проведен анализ темпов и масштабов освоения и обустройства промплощадки по указанным годам.

<sup>6</sup> Гигиенические нормативы 2.1.7.020-94. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг). Дополнение № 1 к перечню ПДК и ОДК № 6229-91.



**Рис. 2. Динамика содержаний марганца (а), никеля (b), мышьяка (с) в почвах промплощадки относительно средних значений**  
**Fig. 2. Dynamics of manganese (a), nickel (b), arsenic (c) contents in the soils of the industrial site relative to average values**

Все промышленные объекты (установка комплексной подготовки газа, кусты скважины, склады, терминалы и пр.) занимают около 7 км<sup>2</sup>.

2019–2022 гг. характеризуются началом работ, это этап опытно-промышленной эксплуатации объекта, установки и подготовки по основным промышленным объектам. Эксплуатация газовых скважин не началась.

2023 г. – интенсивные сварочные работы и установка всего оборудования.

2024 г. – период максимальной мощности добычи и наращивания производственных мощностей.

2025 г. – этап стабилизации технологических процессов и выход на проектируемые параметры.

Показано, что почвы характеризуются кислой и слабокислой средой, низким содержанием органического углерода и низким обогащением азота (рН = 4–5 ед.), органического углерода ( $C_{орг} = 10\%$ ), общего азота ( $N_{общ} = 0,6\%$ ). Закисление почвы и отсутствие необходимого количества органики и азота в почве может обуславливать подвижность некоторых тяжелых металлов и мышьяка, что также способствует миграции этих элементов.

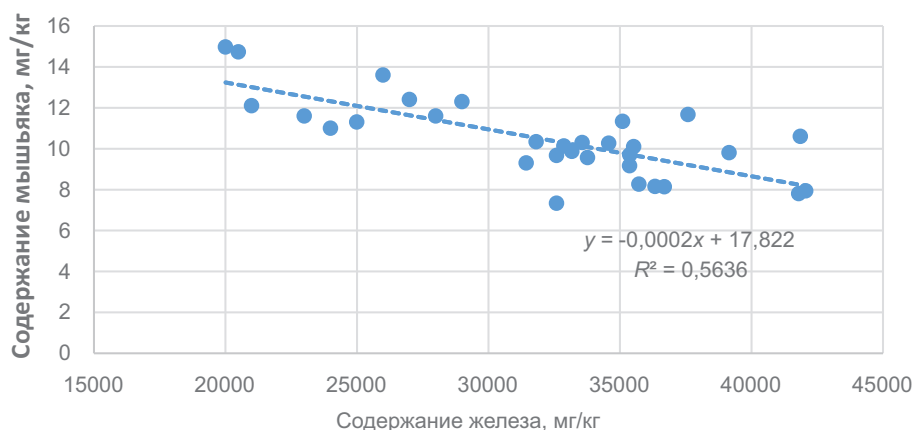
Постоянные сварочные работы, особенно на трубопроводах, которые проложены по всей территории промплощадки, обуславливают активное поступление марганца в почвы. При этом также выявлено большое содержание общего железа в техногенных почвах. Это обусловило аккумуляцию марганца в почвенном слое на геохимическом барьере в виде окислов железа и его конкре-

ций. Причем, независимо от концентрации поступающего в почву марганца, геохимический барьер в виде окислов железа в почве эффективно выполняет свою аккумулятивную роль.

Аналогичная стабильная аккумулирующая зависимость наблюдается в случае распределения никеля в почвах. Однако в случае распределения мышьяка в техногенной почве характер процесса, закрепление мышьяка железом, существенно меняется (рис. 3).

Обнаружена отрицательная корреляция (заметная, умеренная, статистически значимая связь) между содержанием железа и мышьяка с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,5636$ . Это означает, что в отличие от марганца и никеля мышьяк слабо сорбируется на твердой железистой фазе. Причиной наблюдаемого эффекта может быть высокая чувствительность этого металлоида к рН-среде: он максимально закрепляется с высокой степенью окисления V в щелочной среде по сравнению с кислой. А поскольку наблюдаемая рН почвенной среды промплощадки кислая (рН = 4–5), то мышьяк не иммобилизуется на гидроксидах железа. Очевидно также, что при этом валовые формы переходят в более подвижные, поэтому наблюдается уменьшение эффективности железистого барьера к закреплению валового мышьяка.

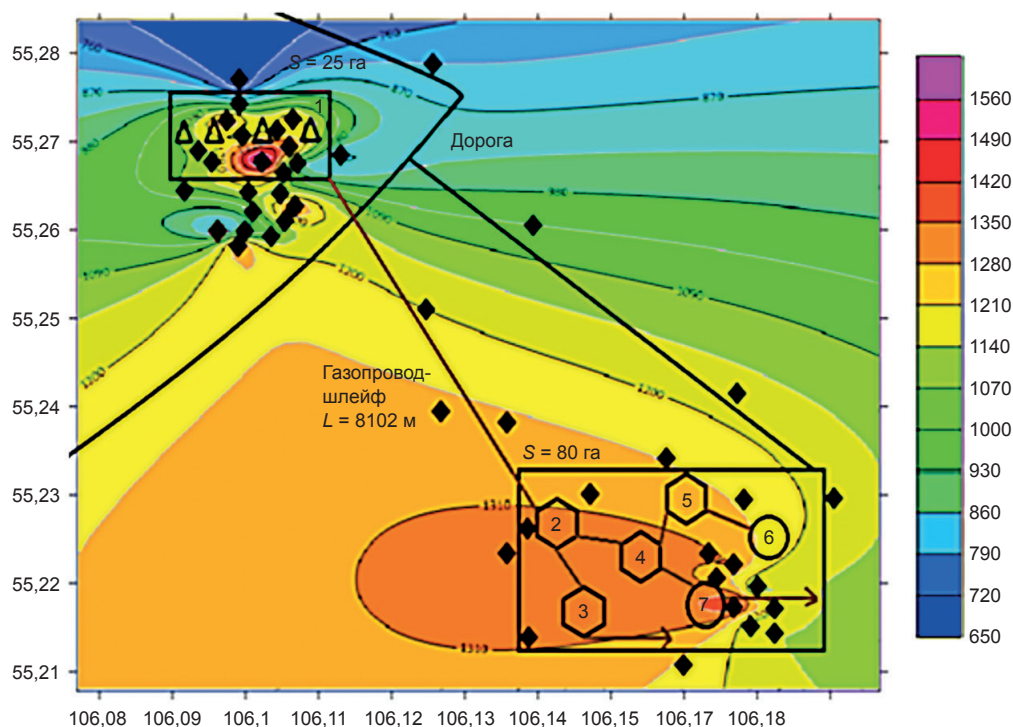
Для визуализации геохимических данных получены ГИС-распределения доминирующих элементов-загрязнителей в почвенном слое за весь период наблюдений. ГИС на основе пространственной привязки геохимиче-



**Рис. 3. Зависимость содержания мышьяка от содержания железа**  
**Fig. 3. Dependence of arsenic content on iron content**

ских данных к территории представляет собой многофункциональный инструмент комплексной оценки ее состояния и прогнозирования устойчивости территорий к негативному эко-

логическому воздействию. На примере 2025 г. приведены визуализированные результаты геохимического анализа почв и направление миграции элементов (рис. 4–6).

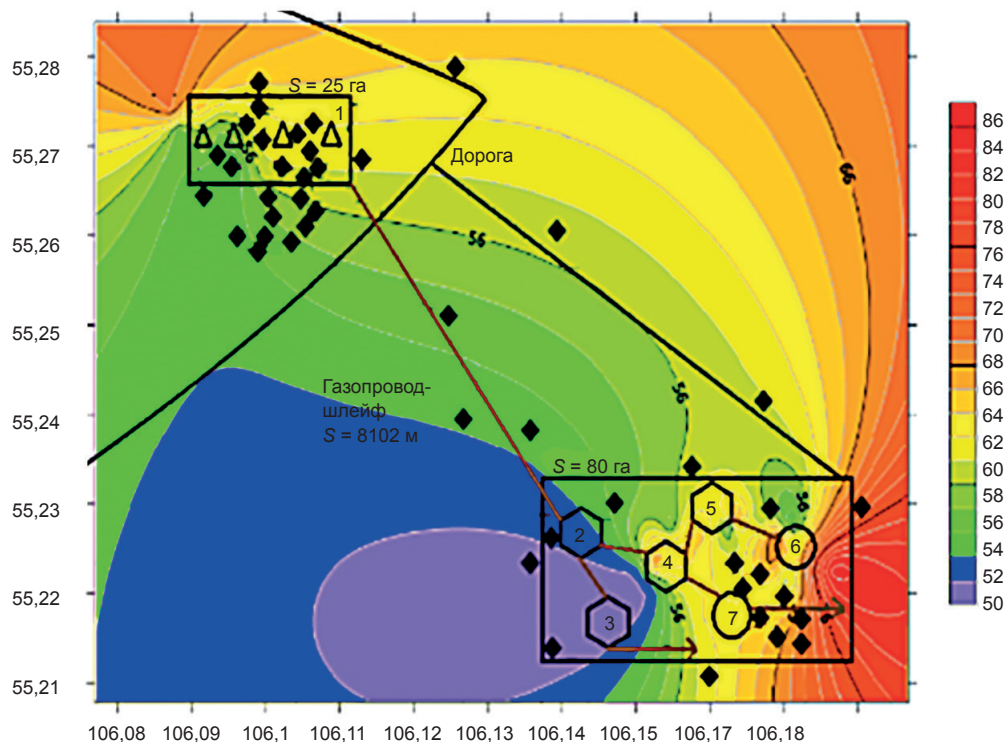


**Рис. 4. Геоинформационное системное распределение марганца в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения, мг/кг:**

- 1 – куст газовых скважин; 2 – установка низкотемпературной сепарации;  
3 – центральная дожимная компрессорная скважина;  
4 – установка стабилизации конденсата; 5 – установка регенерации метанола;  
6 – парк хранения метанола; 7 – парк хранения стабильного конденсата

**Fig. 4. Geoinformation system distribution of manganese in soils at the Kovykta gas condensate field site, mg/kg:**

- 1 – gas well cluster; 2 – low-temperature separation unit;  
3 – central booster compressor well;  
4 – condensate stabilization unit; 5 – methanol recovery unit;  
6 – methanol storage facility; 7 – stable condensate storage facility

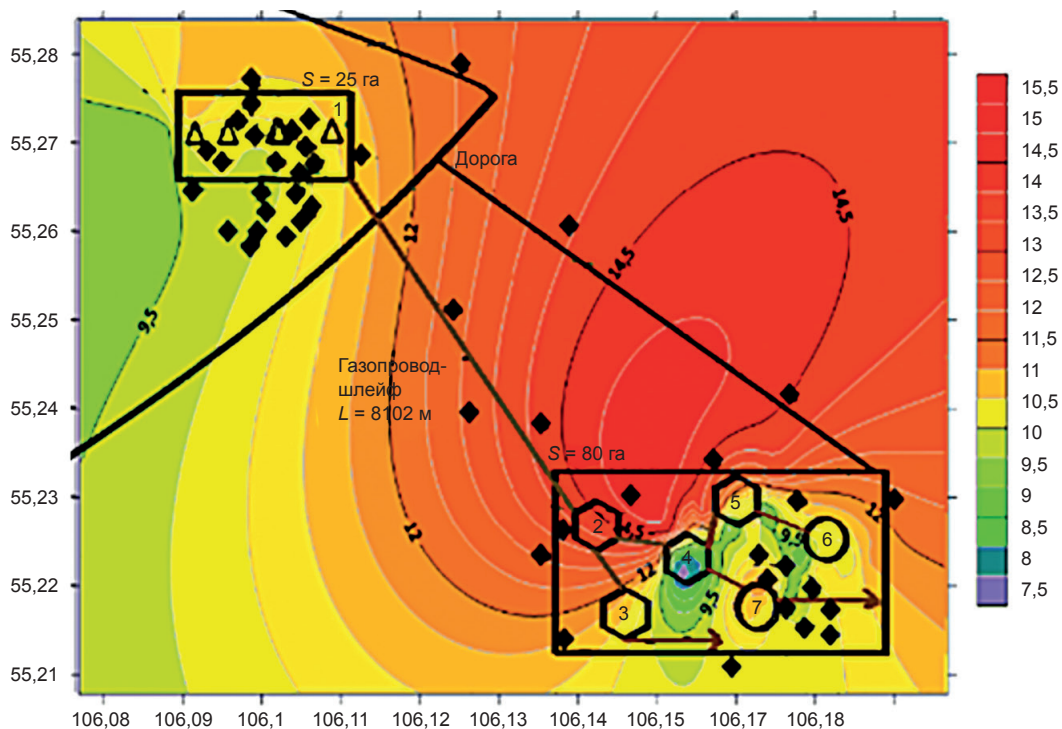


**Рис. 5. Геоинформационное системное распределение никеля в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения, мг/кг:**

Описание условных обозначений см. на рис. 4

**Fig. 5. Geoinformation system distribution of nickel in soils at the Kovykta gas condensate field site, mg/kg:**

For a description of the symbols, see Fig. 4



**Рис. 6. Геоинформационное системное распределение мышьяка в почвах на территории промплощадки Ковыктинского газоконденсатного месторождения, мг/кг:**

Описание условных обозначений см. на рис. 4

**Fig. 6. Geoinformation system distribution of arsenic in soils at the Kovykta gas condensate field site, mg/kg:**

For a description of the symbols, see Fig. 4



Проведенные временной и пространственный ГИС-анализы подтвердили результаты технологического анализа промузлов на площадке с позиции загрязнения почв: в одном случае это природное поступление элемента, в другом – техногенное происхождение повышенных концентраций тяжелых металлов в почвенном слое. Так, марганец преимущественно аккумулируется в почвах в зоне трубопроводов и там, где регулярно происходит сварка: сваривают по 700 м труб в сутки, до 5000 м в неделю. При сварке образуется сварочный аэрозоль в зоне дугового разряда с оксидами марганца и никеля из покрытий электродов. Наличие фторидов натрия в электродах также влияет на образование большого количества марганца, оседающего на почвы.

ГИС-распределение никеля также может быть связано с производством постоянного металлоремонта, сварки труб и истиранием деталей машин от большого потока транспорта. В пике работ ежедневно на месторождении проходит 100–300 единиц транспорта, включая 50–100 грузовиков и 20–50 единиц спецтехники, что эквивалентно 3000–9000 в месяц.

Выявленное на основе ГИС площадное превышение содержания мышьяка в почвах связано с привозным грунтом с Ярактинского месторождения для планировки и обустройства площадки добычи газа. Это согласуется с данными о превышении ОДК мышьяка в почвах данного региона, что обусловлено природным геологогеохимическим фоном Иркутской области в Прибайкалье. Кроме того, обустройство буровых площадок и прокладка геофизических профилей сейсморазведки постоянно нарушают почвенный покров, поднимая мышьяк из нижних горизонтов на поверхность. Превышение содержания мышьяка также связано с подстилающими породами района добычи. Привозной грунт для отсыпки и планировки промышленных площадок Ковыктинского газоконденсатного месторождения богат мышьяком.

Также следует подчеркнуть, что на аккумуляцию указанных элементов в почве может оказывать влияние сорбционная активность подвижных ионов (катионов) кальция, магния, калия, натрия в почвенном поглощающем комплексе, которые поступают на территорию промплощадки в виде рапы (высокосцентри-

рованный раствор солей) от бурения скважин. Это может дополнительно приводить к иммобилизации некоторых элементов на химическом барьере вследствие образования соединений с низкой скоростью миграции, таких как гидроксокомплексы с участием тяжелых металлов.

### Заключение

Выявлен характер пространственно-временного распределения тяжелых металлов и мышьяка на территории газоконденсатного месторождения за период 2019–2025 гг. Временная динамика повышения содержаний элементов марганца, мышьяка, никеля с начала функционирования месторождения по годам позволяет наглядно оценить зависимость между интенсивностью освоения территории в зоне добычи газа и уровнем негативного воздействия в виде поступления этих элементов в почву. Геохимические показатели отражают их высокую функциональность в условиях негативного воздействия при добыче газа и реально оценивают геоэкологическую обстановку на месторождении. Получены коэффициенты накопления элементов относительно мировых кларков по А.П. Виноградову: обнаружен повышенный коэффициент накопления мышьяка, марганца, никеля ( $K_k \geq 1,5$ ). Наглядные ГИС-распределения контролируемых элементов – доминирующих загрязнителей (марганца, никеля, мышьяка) – выявили ореолы их распространения и направления миграции. Показано, что пространственное распределение элементов марганца, никеля связано с технологическими процессами, регулярными производственными работами и сваркой.

Случаи превышения содержаний мышьяка над нормативом могут быть обусловлены наложением геолого-геохимической особенности Прибайкальской природной территории с повышенным содержанием этого металлоида в составе привозного грунта для планировки территории газоконденсатного месторождения.

Таким образом, интеграция ГИС-технологий с результатами геохимических исследований является эффективным инструментом комплексной оценки территории в зоне техногенеза и служит основой для создания эффективного современного объектно-ориентированного мониторинга в зоне газоконденсатного месторождения.



### Список источников

1. Шавина Е.В. Тенденции развития мировой газовой отрасли в современных условиях // Геоэкономика энергетики. 2020. Т. 12. № 4. С. 40–58. [https://doi.org/10.48137/2687-0703\\_2020\\_12\\_4\\_40](https://doi.org/10.48137/2687-0703_2020_12_4_40). EDN: IYKZDR.
2. Шафигуллин Р.И., Сагатов Р.Ф., Аслямов А.И., Павлов Э.И., Абакумов А.В., Мухаметзянов Р.Ф. [и др.]. На страже экологической безопасности // Бурение и нефть. 2023. № 7–8. С. 34–36. EDN: ZCIOZU.
3. Аленичев В.М. Критерии системной оценки изменений природно-технологических систем при недропользовании // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 5–1. С. 207–216. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_207](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_207). EDN: ADWUFY.
4. Pashkevich M.A., Danilov A.S. Ecological security and sustainability // *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 260. P. 153–154. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16233> (дата обращения: 28.01.2026).
5. Исмагилова В.С., Чекушина Т.В. Транспортировка трубопроводного и сжиженного природного газа: сравнительный анализ достоинств и недостатков // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 61–71. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71>. EDN: IROGBA.
6. Белозерцева И.А. Интегральная оценка экологического состояния почвенного покрова при добыче газа в Среднем Приангарье // Почвоведение. 2020. № 2. С. 244–258. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020021>. EDN: ABRVXF.
7. Окмянская В.М. Актуальные вопросы локального экологического мониторинга промышленной площадки на примере нефтегазодобывающего региона // *International Agricultural Journal*. 2022. Т. 65. № 6. С. 1084–1102. [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_6\\_6\\_27](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_27). EDN: VFZKWP.
8. Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere // *Eurasian Mining*. 2019. № 2. P. 3–8. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.01>. EDN: UIEWSK.
9. Кожевин П.А. Показатели почвенного «здоровья» в оценке почв (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 16–25. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
10. Копчик С.В., Копчик Г.Н. Оценка современных рисков избыточного накопления тяжелых металлов в почвах на основе концепции критических нагрузок (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 615–630. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
11. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021. Vol. 54–1. P. 8–12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.
12. Гайрабеков У.Т. Геоэкологические аспекты освоения нефтегазовых месторождений в горных и предгорных районах (на примере Чеченской Республики) // Устойчивое развитие горных территорий. 2016. Т. 8. № 2. С. 127–134. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-2-127-134>. EDN: WMOVZP.
13. Гулиева Г.А. Загрязнение окружающей среды в результате геологоразведочных работ на Физличайском колчеданно-полиметаллическом месторождении // Горный журнал. 2024. № 7. С. 75–79. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.07.12>. EDN: MSUBYX.
14. Сарапулова Г.И. Геохимический подход в оценке воздействия техногенных объектов на почвы // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 388–392. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.388>. EDN: CMPBUO.
15. Сидиков Ф.У. Геоинформационная система: перспективы, рациональное использование программного обеспечения ArcGIS // Молодой ученый. 2012. № 4 (39). С. 86. EDN: NKVLYA.
16. Джалилова Г.Т. Разработка и внедрение информационно-аналитических систем в мониторинге деградационных процессов горных почв // Молодой ученый. 2018. № 19. С. 18–20. EDN: OSUZHP.
17. Glazovskaya M.A. Problems and methods of assessment of the ecogeochemical resilience of soils and the soil cover towards technogenic impacts // *Eurasian Soil Science*. 1999. Т. 32. № 1. С. 99–108. EDN: LFPJXB.
18. Gizatullin R.R., Dvoynikov M.B., Romanova N.A., Nikitin V.V. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks // *Energies*. 2023. Vol. 16. № 5. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/en16052387>.
19. Makwashi N., Zhao D., Abdulkadir M., Ahmed T., Muhammad I. Study on waxy crudes characterization and chemical inhibitor assessment // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 204. P. 108734. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108734>. EDN: YXSCCK.
20. Козлов А.А., Александров И.С., Шестаков Р.А. Методика обнаружения координаты утечки газа как способ повышения безопасности и экологичности эксплуатации магистрального газопровода // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 8. С. 32–37. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-8-32-37>. EDN: LSXHZI.

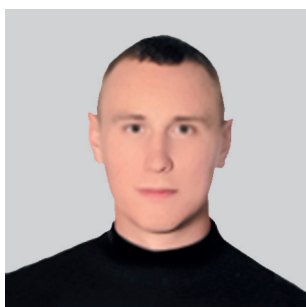
### References

1. Shavina E.V. World gas industry development trends in modern conditions. *Geoeconomics of Energetics*. 2020;12(4):40-58. (In Russ.). [https://doi.org/10.48137/2687-0703\\_2020\\_12\\_4\\_40](https://doi.org/10.48137/2687-0703_2020_12_4_40). EDN: IYKZDR.
2. Shafigullin R.I., Sagatov R.F., Aslyamov A.I., Pavlov E.I., Abakumov A.V., Mukhametzhanov R.F., et al. On guard for environmental safety. *Burenie i neft'*. 2023;7-8:34-36. (In Russ.). EDN: ZCIOZU.
3. Alenichev V.M. Criteria for system assessment of changes in natural and technological systems in subsurface use. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;5-1:207-216. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_51\\_0\\_207](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_51_0_207). EDN: ADWUFY.
4. Pashkevich M.A., Danilov A.S. Ecological security and sustainability. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:153-154. Available from: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16233> [Accessed 28th January 2026].



5. Ismagilova V.S., Chekushina T.V. Transportation of pipeline and liquefied natural gas: comparative analysis of pros and cons. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2023;46(1):61-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-61-71>. EDN: IROGBA.
6. Belozertseva I.A. Experience of integrated assessment of soil cover state at production of underground energy resource in Middle Angara catchment. *Eurasian Soil Science*. 2020;2:244-258. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X20020021>. EDN: ABRVXF.
7. Okmyanskaya V.M. Topical issues of local environmental monitoring of an industrial site on the example of an oil and gas producing region. *International Agricultural Journal*. 2022;65(6):1084-1102. (In Russ.). [https://doi.org/10.55186/25876740\\_2022\\_6\\_6\\_27](https://doi.org/10.55186/25876740_2022_6_6_27). EDN: VFZKWP.
8. Galchenko Yu.P., Eremenko V.A. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in the lithosphere. *Eurasian Mining*. 2019;2:3-8. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.01>. EDN: UIEWSK.
9. Kozhevin P.A. Soil "health" indicators in soil assessment (review). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2023;2:16-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
10. Koptsik S.V., Koptsik G.N. Assessment of current risks of excessive heavy metal accumulation in soils based on the critical loads concept (review). *Eurasian Soil Science*. 2022;5:615-630. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
11. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021;54-1:8-12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.
12. Gayrabekov U.T. Geoecological aspects of oil and gas development in the mountain and foothill areas (using the example of the Chechen Republic). *Sustainable development of mountain territories*. 2016;8(2):127-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-2-127-134>. EDN: WMOVZP.
13. Gulieva G.A. Environmental pollution as a result of geological exploration at the Filizchay Pyrite-polymetallic deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2024;7:75-79. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.07.12>. EDN: MSUBYX.
14. Sarapulova G.I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *Journal of Mining Institute*. 2020;243:388-392. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.388>. EDN: CMPBUO.
15. Sidikov F.U. Geoinformation system: prospects and rational use of ArcGIS software. *Molodoi uchenyi*. 2012;4(39):86. (In Russ.). EDN: NKVLYA.
16. Dzhaililova G.T. Development and implementation of information-analytical systems in mountain soil degradation processes monitoring. *Molodoi uchenyi*. 2018;19(205):18-20. EDN: OSUZHP.
17. Glazovskaya M.A. Problems and methods of assessment of the ecogeochemical resilience of soils and the soil cover towards technogenic impacts. *Eurasian Soil Science*. 1999;32(1):99-108. EDN: LFPJXB.
18. Gizatullin R.R., Dvoynikov M.V., Romanova N.A., Nikitin V.V. Drilling in gas hydrates: managing gas appearance risks. *Energies*. 2023;16(5):1-13. <https://doi.org/10.3390/en16052387>.
19. Makwashi N., Zhao D., Abdulkadir M., Ahmed T., Muhammad I., et al. Study on waxy crudes characterization and chemical inhibitor assessment. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;204:108734. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108734>. EDN: YXSCCK.
20. Kozlov A.A., Aleksandrov I.S., Shestakov R.A. The method of detecting the coordinates of gas leak as a way to improve the safety and environmental friendliness of the operation of the main gas pipeline. *Ecology and industry of Russia*. 2024;28(8):32-37. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-8-32-37>. EDN: LSXHZI.

#### Информация об авторах / Information about the authors



**Пыжььянов Даниил Игоревич,**

аспирант,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ [dan555inx@gmail.com](mailto:dan555inx@gmail.com)  
<https://orcid.org/https://orcid.org/0009-0002-6059-7008>

**Daniil I. Pyzhianov,**

Postgraduate Student,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ [dan555inx@gmail.com](mailto:dan555inx@gmail.com)  
<https://orcid.org/https://orcid.org/0009-0002-6059-7008>



**Сарапулова Галина Ибрагимовна,**

доктор химических наук, профессор,  
профессор кафедры обогащения полезных ископаемых  
и охраны окружающей среды,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
sara131@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5056-3181>

РИНЦ Author ID: 110513

Scopus Author ID: 7004366174

Researcher ID WoS: AAA-9993-2019

**Galina I. Sarapulova,**

Dr. Sci. (Chem.), Professor,  
Professor of the Department of Mineral Processing  
and Environmental Protection,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
sara131@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5056-3181>

РИНЦ Author ID: 110513

Scopus Author ID: 7004366174

Researcher ID WoS: AAA-9993-2019

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

Д.И. Пыжьянов – проведение исследования, предоставление ресурсов, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

Г.И. Сарапулова – разработка концепции, курирование данных, формальный анализ, научное руководство, редактирование рукописи.

Daniil I. Pyzhianov – investigation, resources, validation, visualization, writing – original draft.

Galina I. Sarapulova – conceptualization, data curation, formal analysis, supervision, writing – editing.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by the authors.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 13.02.2026; одобрена после рецензирования 25.02.2026; принята к публикации 05.03.2026.

The article was submitted 13.02.2026; approved after reviewing 25.02.2026; accepted for publication 05.03.2026



Научная статья

УДК 622.248

EDN: RXHRBC

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-7

## Повышение эффективности цементирования скважин в сложных горно-геологических условиях за счет применения подпревенторного герметизатора

В.О. Собенников<sup>a,✉</sup>, Э.Н. Гура<sup>b</sup>, С.А. Сверкунов<sup>c</sup>, А.Г. Вахромеев<sup>d</sup>,  
А.Н. Буглов<sup>e</sup>, Д.Д. Гладышев<sup>f</sup>

<sup>a,c,f</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

<sup>b</sup>ООО «МАШПРОМ-Калуга», Жуков, Российская Федерация

<sup>d</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Российская Федерация

<sup>e</sup>ООО «РН-ГИР», Красноярск, Российская Федерация

**Резюме.** Целью данной работы являлось повышение безопасности и экономической эффективности процесса встречного цементирования обсадных колонн в условиях поглощения промывочной жидкости и риска газонефтеводопроявлений на примере Юрубчено-Тохомского месторождения. В ходе исследования проведен анализ причин частого выхода из строя универсального превентора при выполнении технологии встречного цементирования с закрытым универсальным превентором для создания вакуумного эффекта. Изучены геолого-технические условия Юрубчено-Тохомского месторождения, приведшие к 28 случаям отказа оборудования в 2023–2024 гг. Рассмотрены конструкция и принцип работы подпревенторного герметизатора как альтернативного технологического решения. Выполнена сравнительная технико-экономическая оценка внедрения герметизатора с расчетом дисконтированного денежного потока, срока окупаемости и индекса доходности. Установлено, что основная причина отказа универсального превентора – работа уплотнительного элемента в агрессивной среде цементного раствора под воздействием вакуума, что приводит к потере второго барьера безопасности. Предложенное решение – установка подпревенторного герметизатора между фланцем колонной головки и крестовиной превентора противовыбросового оборудования – позволяет герметизировать затрубное пространство обсадной колонны без использования универсального превентора. Технико-экономическая оценка показала, что единовременные инвестиции в размере 16 млн руб. на оснащение 5 буровых установок окупаются в течение первого года эксплуатации, обеспечивая значительную годовую экономию за счет исключения затрат на ремонт универсального превентора. Внедрение подпревенторного герметизатора позволяет устранить ключевой технологический риск – отказ второго барьера при встречном цементировании, тем самым повышая промышленную безопасность работ. Техническое решение экономически целесообразно, характеризуется индексом доходности менее 1 и дисконтированным сроком окупаемости менее года, может быть рекомендовано для применения на месторождениях со схожими сложными горно-геологическими условиями.

**Ключевые слова:** встречное цементирование, поглощение, газонефтеводопроявление, универсальный превентор, подпревенторный герметизатор, безопасность, экономическая эффективность, Юрубчено-Тохомское месторождение

**Для цитирования:** Собенников В.О., Гура Э.Н., Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г., Буглов А.Н., Гладышев Д.Д. Повышение эффективности цементирования скважин в сложных горно-геологических условиях за счет применения подпревенторного герметизатора // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 84–95. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-7>. EDN: RXHRBC.

Original article

## Improving well cementing efficiency in complex mining and geological conditions through the use of a sub-preventer sealer

Valentin O. Sobennikov<sup>a,✉</sup>, Eduard N. Gura<sup>b</sup>, Sergey A. Sverkunov<sup>c</sup>,  
Andrey G. Vakhromeev<sup>d</sup>, Artem N. Buglov<sup>e</sup>, Danila D. Gladyshev<sup>f</sup>

<sup>a,c,f</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>b</sup>MASHPROM-Kaluga LLC, Zhukov, Russian Federation

<sup>d</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>e</sup>RN-Geology Research and Development LLC, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Abstract.** The purpose of this work is to improve the safety and cost-effectiveness of the counter-cementing process of casing strings under conditions of lost circulation and the risk of gas, oil, and water shows, using the Yurubcheno-Tok-

© Собенников В.О., Гура Э.Н., Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г., Буглов А.Н., Гладышев Д.Д., 2026



homskiye field as an example. The causes of frequent failures of the universal preventer during the counter-cementing with the closed universal preventer in order to create a vacuum effect were analysed. The study was given to the geological and technical conditions of the Yurubcheno-Tokhomskiye field, which led to 28 cases of equipment failure in 2023–2024. The design and operation principle of the sub-preventer sealer as an alternative technological solution were considered. A comparative technical and economic assessment of the sealer implementation was performed and the discounted cash flow, payback period, and profitability index were calculated. It was determined that the main cause of universal preventer failures was due to the operation of the sealing element in an aggressive cement slurry environment under the influence of a vacuum. It led to the loss of the second safety barrier. The proposed solution (to install a sub-preventer sealer between the casing head flange and the blowout preventer crosspiece) allows to seal the annular space of the casing string without the use of a universal preventer. The feasibility study showed that a one-time investment of 16 million rubles for equipping 5 drilling rigs covers the expenses during the first year of operation providing significant annual savings by eliminating the repair cost of the drilling rigs. The introduction of a sub-preventer sealer makes it possible to eliminate a major technological risk of second barrier failure during counter-cementing, thereby increasing the industrial safety of work. The technical solution is economically feasible since its yield index is  $<1$  and its discounted payback period is less than a year. It can be recommended for use in fields with similar complex mining and geological conditions.

**Keywords:** counter-cementing, absorption, gas, oil, and water show, universal preventer, sub-preventer sealer, safety, economic efficiency, Yurubcheno-Tokhomskiye field

**For citation:** Sobennikov V.O., Gura E.N., Sverkunov S.A., Vakhromeev A.G., Buglov A.N., Gladyshev D.D. Improving well cementing efficiency in complex mining and geological conditions through the use of a sub-preventer sealer. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1):84-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-7>. EDN: RXHRBC.

## Введение

Строительство скважин в сложных горно-геологических условиях, характеризующихся наличием аномально-проницаемых трещиноватых коллекторов, сопряжено с высокими технологическими рисками [1–15]. Одним из наиболее критичных является поглощение бурового и цементного раствора, которое приводит к падению гидростатического уровня в стволе и создает предпосылки для газонефтеводопроявления [7, 10, 16–20]. На таких месторождениях, как Юрубчено-Тохомское, стандартная операция прямого цементирования обсадных колонн часто оказывается неэффективной из-за отсутствия возврата тампонажного раствора на устье.

Для обеспечения изоляции затрубного пространства в подобных условиях применяется технология встречного цементирования с закрытым универсальным превентором (превентором универсальным гидравлическим, ПУГ) и закачкой пеноцементного раствора [9, 13], позволяющая создать вакуумный эффект и продавить цементный раствор в пласт [6]. Однако, как показывает практика, данная методика имеет существенный недостаток: цементный раствор и режим репрессии приводят к быстрому износу и выходу из строя резинового уплотнительного элемента ПУГ. Потеря герметичности ПУГ после цементирования означает фактическое отсутствие второго (внешнего) барьера безопасности, что создает прямую угрозу возникновения неконтролируемого фонтана [16] при последующем вскрытии продуктивных горизонтов.

## Материалы и методы исследования

Рассмотрим процесс поглощения промысловой жидкости в разных типах коллекторов. Поглощение промысловой жидкости – это потеря какого-то определенного количества бурового или цементного раствора в результате его перетока из скважины в пласт.

Разные типы коллекторов обладают отличающимися друг от друга фильтрационно-емкостными свойствами, что определяет различный характер поглощений, присущий для коллекторов данного типа [11]. Аномально-проницаемый карбонатный коллектор (рис. 1, а) сложен трещиновато-карбонатными породами, трещины в котором имеют вертикальное и субвертикальное расположение [14], что значительно осложняет процесс бурения такого коллектора вследствие возникновения катастрофических поглощений без выхода циркуляции. Для сравнения с терригенным коллектором [14] (рис. 1, б), который сложен песчаными породами и менее проницаем, фильтрационно-емкостные свойства аномально-проницаемого коллектора обеспечивают высокую вероятность падения критического уровня промысловой жидкости в скважине [16].

*Основной фактор возникновения газонефтеводопроявлений.* Возникновение газонефтеводопроявлений связано с падением гидростатического уровня бурового раствора в скважине за счет поглощения в продуктивном горизонте [16].

В связи с крайне высокими фильтрационно-емкостными свойствами пласта перерас-



a



b

**Рис. 1. Коллектор (фото авторов статьи):**

a – коллектор карбонатного типа; b – коллектор терригенного типа

**Fig. 1. Reservoir (photo made by the authors of the article):**

a – carbonate reservoir; b – terrigenous collector

пределение забойных давлений в системе «скважина – пласт» занимает минимальный промежуток времени, что на практике сопровождается молниеносным переходом скважины из поглощения в газонефтеводопроявление (рис. 2).

Основными мероприятиями по предотвращению газонефтеводопроявления являются:

- проведение бурения с роторным устьевым герметизатором (ПУГ) [12];
- поддержание статического уровня выше критического при спуско-подъемной операции;

– тщательный контроль за наличием бурового раствора в емкостях буровых установок.

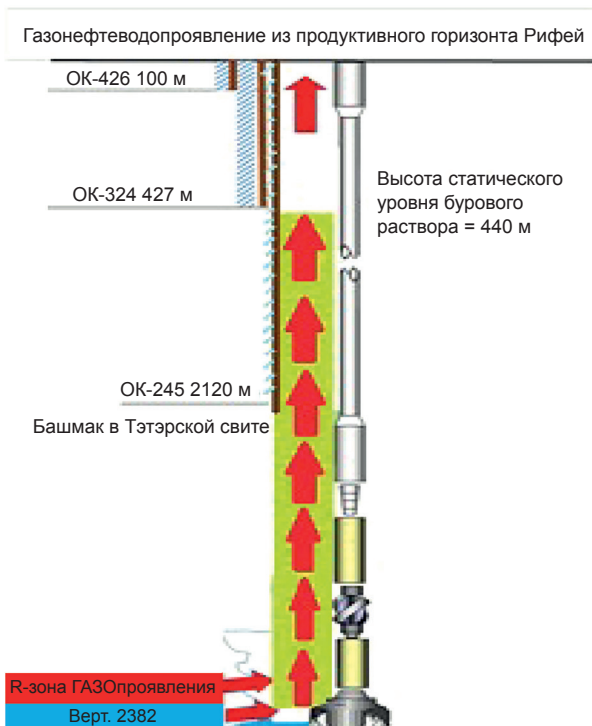
**Процесс крепления скважин.** Процесс крепления скважин на Юрубчено-Тохомском месторождении состоит из следующих операций:

- 1) закачка буфера;
- 2) затворение и закачка пеноцементного раствора [9];
- 3) пуск цементирующей пробки;
- 4) закачка продажной жидкости;
- 5) опрессовка колонны;
- 6) проведение встречного цементирования [17];
- 7) создание давления в колонне в 100 атм;
- 8) подбиваем цементирующей агрегат к колонной головке;
- 9) закрываем ПУГ;
- 10) проверяем приемистость;
- 11) закачиваем пеноцементный раствор [9];
- 12) заключительный этап – ожидание затвердения цемента (ОЗЦ) с закрытым ПУГ.

После ОЗЦ зачастую выявляется факт потери работоспособности ПУГ (рис. 3), а именно выход из строя уплотнительного элемента. Причиной наступившего инцидента является нарушение эксплуатационных характеристик универсального превентора, в результате применения оборудования в условиях рабочей среды – цементный раствор и работа при вакуумном эффекте за счет режима репрессии скважины.

Итого за 2023 и 2024 гг. на Юрубчено-Тохомском месторождении было зафиксировано 28 случаев выхода из строя ПУГ после проведения встречного цементирования.

В связи с частым выходом из строя резинового уплотнителя ПУГ после встречного цементирования есть риск остаться без вто-



**Рис. 2. Возникновение газонефтеводопроявления (рисунок сделан авторами статьи)**

**Fig. 2. Occurrence of a gas and oil show (drawing made by the authors of the article)**



a



b

**Рис. 3. Поврежденный уплотнительный элемент (фото авторов статьи):**

*a – вид сверху; b – вид снизу*

**Fig. 3. Damaged sealing element (photo made by the authors of the article):**

*a – top view; b – bottom view*

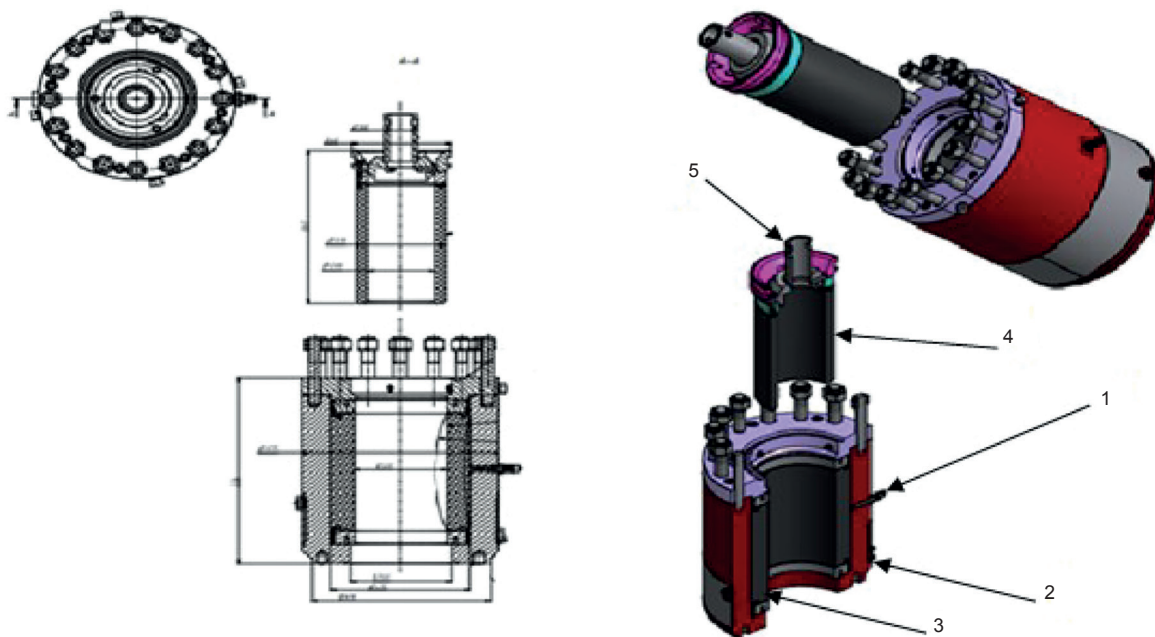
рого барьера, что может привести к рискам, связанным с жизнью людей и потерей дорогостоящего оборудования. В качестве герметизации устья для встречного цементированья возможно рассмотреть к использованию РУГ, однако в процессе закачки тампонажного раствора есть риск его попадания на ниже установленный уплотнительный элемент ПУГ, и вследствие некачественной промывки в процессе ОЗЦ цементный раствор затвердеет на уплотнителе ПУГ, что в будущем также негативно скажется на его дальнейшей работе. Следует к тому же отметить, что отказаться от герметизации затрубного пространства при выполнении встречного цементированья не представляется возможным, так как повторное встречное цементированье необходимо будет выполнять несколько раз, что нецелесообразно и приведет к увеличению сроков строительства скважины и значительному росту финансовых затрат.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Решением данной проблемы может быть применение подпревенторного герметизатора (рис. 4), устанавливаемого между

фланцем колонной головки и крестовиной превентора противовыбросового оборудования. На данный момент авторами на других месторождениях не зафиксировано применение каких бы то ни было подпревенторных герметизаторов для проведения встречного цементированья. Подпревенторный герметизатор, представленный в статье, является вновь разработанным оборудованием, которого еще нет в серийном производстве. Данное оборудование разработано для решения задач цементированья в сложных горно-геологических условиях месторождений нефти и газа юга Сибирской платформы.

Подпревенторный герметизатор состоит из следующих элементов: металлический корпус (2), штуцер для нагнетания масла ручным гидравлическим насосом (1), внутри корпуса располагается уплотнительный элемент (3) под ОК-245. То есть масло под давлением попадает в камеру между корпусом герметизатора и уплотнительным элементом, под действием чего мембрана обжимает обсадную колонну. После выполнения работ по встречному цементированью для ОК-245 и ремонта противовыбросового оборудования на специальном ключе (5) спускаем манже-



**Рис. 4. Подпревенторный герметизатор (рисунок сделан авторами статьи):**  
1 – штуцер; 2 – корпус подпревенторного герметизатора; 3 – уплотнительный элемент под ОК-245; 4 – уплотнительный элемент под ОК-178; 5 – ключ для установки уплотнительного элемента под ОК-178

**Fig. 4. Sub-preventer sealer (drawing made by the authors of the article):**  
1 – nozzle; 2 – sub-preventer sealer body; 3 – sealing element for OK-245; 4 – sealing element for OK-178; 5 – wrench for installing the sealing element for OK-178

ту (уплотнительный элемент (4)) под ОК-178 к герметизатору, попадаем в нужные пазы и поднимаем ключ на поверхность. По предварительным расчетам установка составит 5–10 минут. Бурение под эксплуатационную колонну будет осуществляться с двумя установленными мембранами на герметизаторе. При встречном цементировании принцип работ такой же, как и на технической колонне, только первая мембрана будет давить на вторую, так мы полностью обождем ОК-178. Закрывать ПУГ при этом нет необходимости.

Внутренний диаметр первой мембраны для ОК-245 в неактивированном состоянии – 320 мм; внутренний диаметр второй мембраны для ОК-178 в неактивированном состоянии – 230 мм.

На рис. 5 указано место установки подпревенторного герметизатора.

Альтернативным вариантом подпревенторному герметизатору может быть одноплащечный превентор с плашками под диаметр 245/178 мм.

Недостатки:

- по сравнению с подпревенторным герметизатором стоимость выше в 2,5 раза;
- на смену плашек затратится гораздо больше времени, чем на смену уплотнитель-

ного элемента технологического герметизатора;

- необходимо проводить опрессовку, так как является противовыбросовым оборудованием;

- подходит не ко всем буровым установкам (# БУ-2900/200).

Подпревенторный герметизатор имеет следующие преимущества:

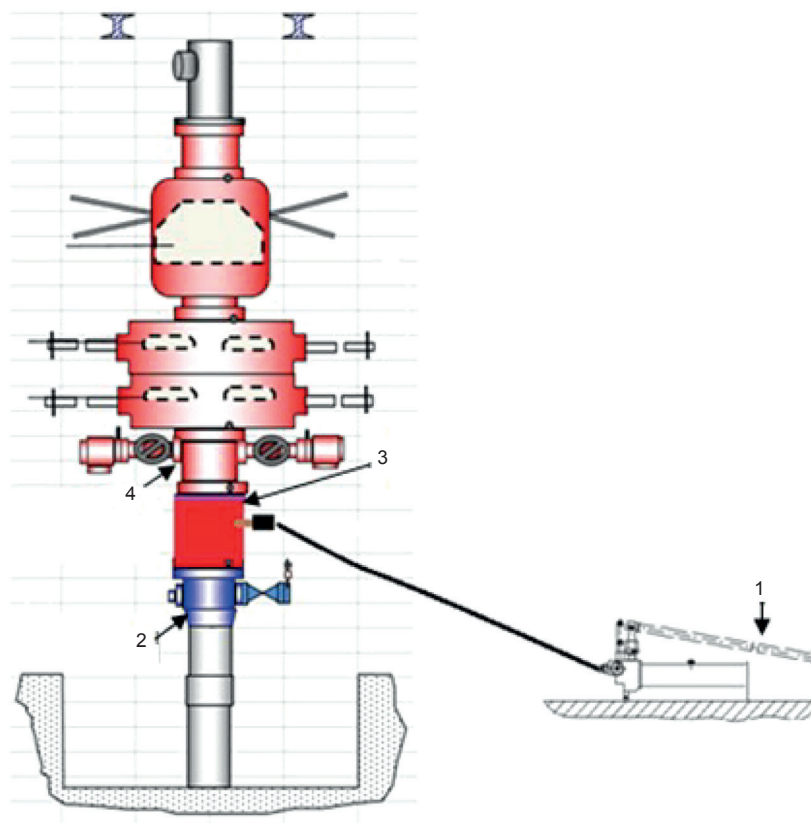
- отсутствует необходимость использования ПУГ;

- нет опасности выхода из строя второго барьера, следовательно, соблюдаются все правила противofонтанной безопасности;

- цементирование выполняется при вскрытых продуктивных горизонтах с газонасыщением, где после завершения встречного цементирования происходит снижение уровня ниже критического и газонефтеводопроявление, при этом ПУГ будет работоспособен.

Ключевой момент – безопасность. Подпревенторный герметизатор будет способствовать сохранению всего дорогостоящего бурового оборудования в случае газонефтеводопроявления и, безусловно, здоровья и жизни полевого персонала.

Далее рассмотрим экономический эффект. Расчет выполнен на примере бурового



**Рис. 5. Место установки подпревенторного герметизатора (рисунок сделан авторами статьи):**

1 – насос ручной гидравлический; 2 – колонная головка; 3 – подпревенторный герметизатор;  
4 – крестовина противовыбросового оборудования

**Fig. 5. Installation location of the sub-preventer sealer (drawing made by the authors of the article):**

1 – hydraulic hand pump; 2 – casing head; 3 – sub-preventer sealer;  
4 – blow-out preventer crosspiece

предприятия X, работающего на месторождении с аномально-проницаемым коллектором. В работе пять буровых установок:

- стоимость подпревенторного герметизатора, с учетом опытно-промышленных испытаний/исследований (ОПИ) – 10 млн руб.;
- стоимость подпревенторного герметизатора при массовом производстве, шт. – 1 млн руб.;
- стоимость резинового уплотнителя ПУГ, шт. – 360 тыс. руб.;
- стоимость резинового уплотнителя на герметизаторе, шт. – 100 тыс. руб.;
- дополнительное встречное цементование без герметизации затруба, шт. – 350 тыс. руб.

Затраты в 2025 г. на замену уплотнителя ПУГ составят 18 млн руб.

Затраты на покупку подпревенторного герметизатора для пяти станков (бурового предприятия X), работающих на месторождении с аномально-проницаемым кол-

лектором, с учетом ОПИ – 16 млн руб. (из них 10 млн руб. – для проведения ОПИ, 5 млн руб. – на закупку пяти герметизаторов и 1 млн руб. – на закупку 10 запасных резиновых уплотнений). Отдельно стоит упомянуть о важности герметизации затрубного пространства при встречном цементовании. Если же этого не делать, то необходимо будет выполнять повторное встречное цементование 2–3 раза. На рис. 6 изображен график окупаемости подпревенторного герметизатора, характеризующий экономию в 35,7 млн руб. за пять лет и дисконтированный срок окупаемости в первый год. В табл. 1 представлены инвестиционные затраты на проект, в табл. 2 указана экономия расходов в год от внедрения в производство подпревенторного герметизатора. В табл. 3 – операционный денежный поток, учитывающий ставку дисконтирования, с индексом доходности и сроком окупаемости [8].

**Таблица 1. Инвестиционные затраты на проект**  
**Table 1. Project investment costs**

Наименование	Сумма с НДС, руб.
Приобретение оборудования: подпревенторный герметизатор – 5 шт. (с учетом ЗИП и ОПИ)	16000000
Итого	16000000

*Примечание.* ЗИП – комплект запасных частей, инструментов и принадлежностей. ОПИ – опытно-промышленные испытания/исследования.

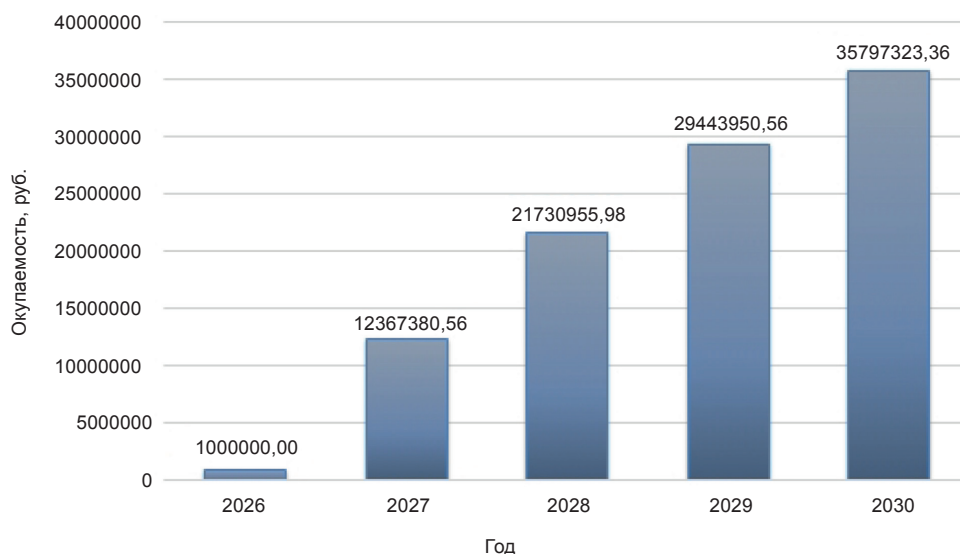
**Таблица 2. Экономия затрат в год**  
**Table 2. Annual cost savings**

Наименование	Величина
Замена резины в год, шт.	50
Стоимость замены резины ПУГ, руб.	360000
Стоимость ЗИП для подпревенторного герметизатора в год для 5 буровых установок, руб.	1000000
Затраты на ремонт ПУГ в год	18000000
Экономия в год	17000000

*Примечание.* ПУГ – превентор универсальный гидравлический.

**Таблица 3. Операционный денежный поток**  
**Table 3. Operating cash flow**

Показатель	2026	2027	2028	2029	2030
Операционный денежный поток, руб.	1000000	17000000	17000000	17000000	17000000
Инвестиционный денежный поток, руб.	16000000	–	–	–	–
Полезный срок использования, лет	5				
Амортизационные отчисления, руб.	–	3200000	3200000	3200000	3200000
Денежный поток по проекту, руб.	1000000	13800000	13800000	13800000	13800000
Денежный поток по проекту с нарастающим итогом, руб.	1000000	14800000	28600000	42400000	56200000
Срок окупаемости недисконтированный, лет	Менее года				
Ставка рефинансирования, %	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
Инфляция, %	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Ставка дисконтирования, %	21,4	21,4	21,4	21,4	21,4
Коэффициент дисконтирования, абс. пок.	1,00	0,82	0,68	0,56	0,46
Дисконтированный поток, руб.	1000000	11367381	9363575	7712995	6353373
Дисконтированный поток с нарастающим итогом, руб.	1000000	12367381	21730956	29443951	35797323
Дисконтированный денежный поток по операционной деятельности + амортизация, абс. пок.	1000000	17203295	14734839	12701515	11026619
Индекс доходности	3,54				
Срок окупаемости дисконтированный, лет	Менее года				



**Рис. 6. График окупаемости подпревенторного герметизатора для бурового предприятия X (рисунок сделан авторами статьи)**  
**Fig. 6. Payback schedule of the sub-preventer sealer for drilling company X (graph made by the authors of the article)**

На примере Юрубчено-Тохомского месторождения было проведено тщательное исследование, перейдем к заключительной части.

### Заключение

Внедрение подпревенторного герметизатора является ключевым решением для повышения безопасности и эффективности встречного цементирования скважин в условиях поглощений. Он устраняет основной недостаток традиционной технологии – износ уплотнителя

универсального превентора при использовании его для герметизации устья, тем самым сохраняя оба барьера безопасности. Применение аналогов (ПУГ, РУГ) нецелесообразно в связи с высокими технологическими рисками дальнейшей неработоспособности данного оборудования, напрямую связанного с противодонной безопасностью. Также применение РУГ и ПУГ при цементировании приведет к дополнительным существенным финансовым и временным затратам бурового предприятия.

### Список источников

1. Foroushan H.K., Lund B., Ytrehus Ja.D., Saasen A. Cement placement: an overview of fluid displacement techniques and modelling // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 3. P. 573. <https://doi.org/10.3390/en14030573>. EDN: RAKHTJ.
2. Mahmoud A.A., Abdelaal A., Adjei S., Elkatatny S. Foamed cement applications in oil industry based on field experience: a comprehensive review // *ACS Omega*. 2024. Vol. 9. № 9. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07580>.
3. Sayindla S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 159. P. 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.069>.
4. Veliyev E.F., Aliyev A.A. Comparative analysis of the geopolymer and Portland cement application as plugging material under conditions of incomplete displacement of drilling mud from the annulus // *SOCAR Proceedings*. 2022. № 1. P. 108–115. <https://doi.org/10.5510/OGP20220100637>.
5. Wang H., Huang H., Bi W., Ji G., Zhou B., Zhuo L. Deep and ultra-deep oil and gas well drilling technologies: progress and prospect // *Natural Gas Industry*. 2022. Vol. 9. Iss. 2. P. 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.019>. EDN: UCQWGJ.
6. Быков В.В., Палеев С.А., Ахметзянов Р.Р., Захаренков А.В., Закиров Н.Н. Комплексный подход к цементированию обсадных колонн в осложненных условиях месторождений Восточной Сибири // *Нефтяное хозяйство*. 2024. № 8. С. 58–61. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-8-58-61>.
7. Дарвиш С. Достижение зональной изоляции на втором по величине нефтяном месторождении в мире: десятилетие обучения (месторождение Румайла, Ирак) // Конференция SPE/IADC по бурению. OnePetro. 2025.
8. Дьяченко О.И. Методика управления операционной эффективностью эксплуатации нефтегазодобывающих компаний // *Экономические науки*. 2016. № 12. С. 76–82. EDN: YJBHUD.
9. Заливин В.Г. Ресурсосберегающие технологии применения пены при бурении скважин // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2025. № 8. С. 43–49. EDN: IPASCM.



10. Ismagilova E.R. Development the self-healing concept for well cement support integrity maintenance. theory and practice // *Kazakhstan Journal for Oil and Gas Industry*. 2024. Vol. 6. Iss. 1. P. 64–73. <https://doi.org/10.54859/kjogi108662>. EDN: TZVZRC.
11. Крючков Д.О., Пивовар А.В., Кузнецова Л.С., Кизимов П.Л. Оперативный сейсмогеологический анализ при сопровождении бурения – первый шаг к эффективности разработки месторождения // *Нефтепромысловое дело*. 2024. № 4. С. 34–42. EDN: WAFYYG.
12. Пат. № 2684261, Российская Федерация, E21B 33/068. Герметизатор устьевого роторный / А.М. Легостаев, Б.Ю. Хайруллин, О.Л. Витязев. Заявл. 24.07.2018; опубл. 04.04.2019. Бюл. № 10.
13. Пат. № 2188302, Российская Федерация, E21B 33/14. Способ ступенчатого цементирования скважины в условиях аномально низких пластовых давлений в зоне поглощения / С.В. Нерсесов, В.Г. Мосиенко, Р.А. Гасумов, В.И. Чернухин, О.С. Остапов, В.З. Минликаев, А.В. Климанов. Заявл. 19.09.2000; опубл. 27.08.2002. Бюл. № 24.
14. Пивовар А.В., Колесов В.А., Калистров С.А., Загривный Ф.А., Мишаков М.В. Влияние геологических условий на износ долот в интервале рифейских отложений Юрубчено-Тохомского месторождения // *Нефтяное хозяйство*. 2022. № 1. С. 50–53. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-1-50-53>. EDN: VLAOSB.
15. Пивовар А.В., Плешко Н.Н., Филатова В.П., Крючков Д.О. Оптимизация бурения горизонтальных скважин в карбонатных коллекторах Восточной Сибири: результаты применения сейсмогеологического анализа // *Нефтяное хозяйство*. 2025. № 5. С. 94–98. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2025-5-94-98>. EDN: NBSTYG.
16. Рыженко В.Ю. Нефтяная промышленность России: состояние и проблемы // *Перспективы науки и образования*. 2014. № 1. С. 300–308. EDN: RVOKMP.
17. Самсоненко Н.В., Мнацаканов В.А., Мансуров М.Н., Потапов А.Г. Проблемы первичного цементирования газовых эксплуатационных горизонтальных скважин Харасавэйского ГКМ // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2026. № 1. С. 37–43. EDN: URCINR.
18. Чернышов С.Е., Ашихмин С.Г., Кашников Ю.А. Оценка сохранности крепи скважин после проведения кумулятивной перфорации с учетом критерия разрушения цементного камня // *Нефтяное хозяйство*. 2021. № 6. С. 50–53. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-6-50-53>. EDN: QNHGRQ.
19. Шамилов В.М., Абдуллаев А.И., Кулиев И.Б., Сафаров Я.О., Шамилов Ф.В. Влияние наноструктурированного цементного раствора на качество цементирования скважин // *Нефтяное хозяйство*. 2025. № 3. С. 52–55. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2025-3-52-55>. EDN: GHJSVQ.
20. Шуть К.Ф., Храбров В.А. Исследование устойчивости полых микросфер к щелочной среде тампонажного раствора // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. 2026. № 2. С. 39–43. EDN: JXIIJR.

### References

1. Foroushan H.K., Lund B., Ytrehus Ja.D., Saasen A. Cement placement: an overview of fluid displacement techniques and modelling. *Energies*. 2021;14(3):573. <https://doi.org/10.3390/en14030573>. EDN: RAKHTJ.
2. Mahmoud A.A., Abdelaal A., Adjei S., Elkhatatry S. Foamed cement applications in oil industry based on field experience: a comprehensive review. *ACS Omega*. 2024;9:9. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07580>.
3. Sayindla S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;159:49-57. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.069>.
4. Veliyev E.F., Aliyev A.A. Comparative analysis of the geopolymer and Portland cement application as plugging material under conditions of incomplete displacement of drilling mud from the annulus. *SOCAR Proceedings*. 2022;1:108-115. <https://doi.org/10.5510/OGP20220100637>.
5. Wang H., Huang H., Bi W., Ji G., Zhou B., Zhuo L. Deep and ultra-deep oil and gas well drilling technologies: progress and prospect. *Natural Gas Industry*. 2022;9(2):141-157. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.019>. EDN: UCQWJG.
6. Bykov V.V., Paleev S.A., Akhmetzyanov R.R., Zaharenkov A.V., Zakirov N.N. An integrated approach to cementing casing strings in difficult conditions of fields in Eastern Siberia. *Oil Industry*. 2024;8:58-61. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-8-58-61>. EDN: HUKHNA.
7. Darvish S. Achieving zonal isolation in the second largest oil field in the world: decade of training (Rumaila field, Iraq). In: *SPE/IADC Drilling Conference*. OnePetro. 2025.
8. Diachenko O.I. The method of oil and gas fields operational efficiency management. *Scientific Journal Economic Sciences*. 2016;12:76-82. (In Russ.). EDN: YJBHUD.
9. Zalivin V.G. Resource-saving technologies of foam application in wells drilling. *Onshore and offshore oil and gas well construction*. 2025;8:43-49. (In Russ.). EDN: IPASCM.
10. Ismagilova E.R. Development the self-healing concept for well cement support integrity maintenance. theory and practice. *Kazakhstan Journal for Oil and Gas Industry*. 2024;6(1):64-73. <https://doi.org/10.54859/kjogi108662>. EDN: TZVZRC.
11. Kryuchkov D.O., Pivovarov A.V., Kuznetsova L.S., Kizimov P.L. Real time seismogeological analysis while drilling is the first step to oilfield development efficiency. *Oilfield engineering*. 2024;4:34-42. (In Russ.). EDN: WAFYYG.
12. Legostaev A.M., Khairullin B.Y., Vityazev O.L. *Rotary mouth sealer*. Patent RF, no. 2684261; 2019. (In Russ.).
13. Nersesov S.V., Mosienko V.G., Gasumov R.A., Chernukhin V.I., Ostap O.S., Minlikaev V.Z., Klimanov A.V. *Method of stepwise drilling of a well under conditions of abnormally low reservoir pressures in the absorption zone*. Patent RF, no. 2188302; 2002. (In Russ.).



14. Pivovarov A.V., Kolesov V.A., Kalistratov S.A., Zagrivniy F.A., Mishakov M.V. Influence of geological conditions on wear-out of the bits in the Riphean deposits of the Yurubcheno-Tokhomskeye field. *Oil Industry*. 2022;1:50-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-1-50-53>. EDN: VLAOSB.
15. Pivovarov A.V., Pleshko N.N., Filatova V.P., Kryuchkov D.O. Optimization of horizontal well drilling in carbonate reservoirs of eastern Siberia: results from the application of seismic-geological analysis. *Oil Industry*. 2025;5:94-98. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2025-5-94-98>. EDN: NBSTYG.
16. Ryzhenko V.Iu. Russian oil industry: state and problems. *Perspectives of Science and Education*. 2014;1:300-308. (In Russ.). EDN: RVOKMP.
17. Samsonenko N.V., Mnatsakanov V.A., Mansurov M.N., Potapov A.G. Problems of primary cementing of horizontal gas production wells at the Kharasaveyskoye gas-condensate field. *Onshore and offshore oil and gas well construction*. 2026;1:37-43. (In Russ.). EDN: URCINR.
18. Chernyshov S.E., Ashikhmin S.G., Kashnikov Yu.A., Savich A.D., Mosin A.V., Chulrhlov A.S. Evaluation of the cement sheath safety after shaped charge perforation considering the criterion of cement stone destruction. *Oil Industry*. 2021;6:50-53. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-6-50-53>. EDN: QNHGRQ.
19. Shamilov V.M., Abdullayev A.I., Guliyev I.B., Safarov Ya.O., Shamilov F.V. The influence of nanostructured cement slurry on the quality of well cementing. *Oil Industry*. 2025;3:52-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2025-3-52-55>. EDN: GHJSVQ.
20. Shut K.F., Khrabrov V.A. Study of hollow microspheres stability to the alkaline environment of cement slurry. *Construction of oil and gas wells on land and sea*. 2026;2:39-43. EDN: JXIIJR.

### Информация об авторах / Information about the authors



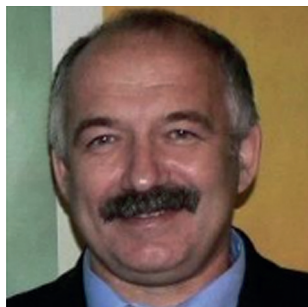
**Собенников Валентин Олегович**,  
аспирант,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ [valentin\\_38rus@mail.ru](mailto:valentin_38rus@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0002-1761-4693>  
**Valentin O. Sobennikov**,  
Postgraduate Student,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ [valentin\\_38rus@mail.ru](mailto:valentin_38rus@mail.ru)  
<https://orcid.org/0009-0002-1761-4693>



**Гура Эдуард Николаевич**,  
технический директор,  
ООО «МАШПРОМ-Калуга»,  
г. Жуков, Российская Федерация,  
[gura6969@mail.ru](mailto:gura6969@mail.ru)  
**Eduard N. Gura**,  
Technical Director,  
MASHPROM-Kaluga LLC,  
Zhukov, Russian Federation,  
[gura6969@mail.ru](mailto:gura6969@mail.ru)



**Сверкунов Сергей Александрович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
[dobro\\_75@mail.ru](mailto:dobro_75@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-4677-4186>  
**Sergey A. Sverkunov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Production,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
[dobro\\_75@mail.ru](mailto:dobro_75@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-4677-4186>

**Вахромеев Андрей Гелиевич,**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор кафедры нефтегазового дела,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
заведующий лабораторией нефти, газа и гидроминерального сырья,  
Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
эксперт отдела технологического развития  
группы по численному и математическому моделированию,  
ООО «РН-ГИР»,  
г. Красноярск, Российская Федерация,  
andrey\_igp@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-7309-4464>

**Andrey G. Vakhromeev,**

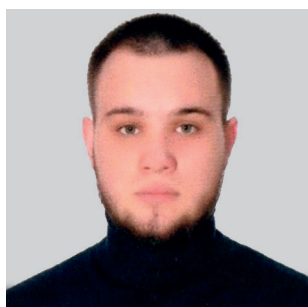
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
Head of the Laboratory of Oil, Gas and Hydromineral Raw Materials,  
Institute of the Earth's Crust,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,  
Expert of the Technological Development Department  
of the Numerical and Mathematical Modeling Group,  
RN-Geology Research and Development LLC,  
Krasnoyarsk, Russian Federation,  
andrey\_igp@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-7309-4464>

**Буглов Артем Николаевич,**

магистрант,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
artbuglov@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-4025-3426>

**Artem N. Buglov,**

Master's Degree Student,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
artbuglov@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-4025-3426>

**Гладышев Данила Дмитриевич,**

магистрант,  
Институт экономики, управления и права,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
danila.gladyshev.2016@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-9677-1965>

**Danila D. Gladyshev,**

Master's Degree Student,  
Institute of Economics, Management and Law,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
danila.gladyshev.2016@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0004-9677-1965>



### Вклад авторов / Contribution of the authors

В.О. Собенников – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.

Э.Н. Гура – визуализация, редактирование рукописи.

С.А. Сверкунов – разработка концепции, курирование данных, формальный анализ, научное руководство, редактирование рукописи.

А.Г. Вахромеев – проведение исследования, предоставление ресурсов, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

А.Н. Буглов – визуализация, редактирование рукописи.

Д.Д. Гладышев – проведение исследования, разработка методологии, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

Valentin O. Sobennikov – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.

Eduard N. Gura – visualization, writing – editing.

Sergey A. Sverkunov – conceptualization, data curation, formal analysis, supervision, writing – editing.

Andrey G. Vakhromeev – investigation, resources, validation, visualization, writing – original draft.

Artem N. Buglov – visualization, writing – editing.

Danila D. Gladyshev – investigation, methodology, formal analysis, validation, visualization, writing – original draft.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 23.03.2026.

The article was submitted 04.03.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 23.03.2026.



Научная статья

УДК 624.131.31

EDN: ERLVOT

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-1-8

## Сравнительная оценка информативности спутниковых данных и данных с беспилотных летательных аппаратов при решении задач картирования оползневой опасности

С.А. Гантимурова<sup>a</sup>, А.В. Паршин<sup>b</sup>✉, Г. Хуан<sup>c</sup>,  
Ц. Ли<sup>d</sup>, Ц. Цзин<sup>e</sup>, В.Т. Залуцкий<sup>f</sup>

<sup>a,b,f</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Иркутск, Российская Федерация

<sup>b</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук,  
Иркутск, Российская Федерация

<sup>c-e</sup>Чанъаньский университет, Сиань, Китай

**Резюме.** Использование методов дистанционного зондирования Земли позволяет быстро изучать большие по площади и труднодоступные территории, в пределах которых могут происходить опасные гравитационные геологические процессы (оползни, камнепады). Картирование оползневых зон на основе спутниковых данных в региональном масштабе на сегодняшний день уже хорошо развито на практике. В последние десятилетия стремительно развиваются теория и практика применения технологий беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования Земли. В обоих случаях для анализа георисков используются мультиспектральные данные и цифровые модели рельефа. Целью данного исследования является сравнительный анализ результатов картирования оползневой опасности, полученных на основе общедоступных спутниковых данных и данных с беспилотных летательных аппаратов, и выявление преимуществ и ограничений обеих методик. Ключевые предикторы (углы уклона склонов, профильная кривизна, нормализованный относительный индекс растительности, индекс влажности и коэффициент длины-уклона) для спутниковых данных были получены из цифровых моделей рельефа ALOS AW3D30 и данных Sentinel-2. Данные с беспилотных летательных аппаратов были получены фотограмметрическим методом с помощью мультиспектральных фотокамер. Для определения весов факторов применялся метод аналитической иерархии через попарные сравнения. Средствами QGIS построены карты рисков оползневых процессов для одного и того же участка территории. Сравнительный анализ наглядно показал, как различие в разрешении входных данных и методике съемки влияет на прогностическую ценность результатов. Основной вывод: из-за генерализации по разрешению (в случае спутниковых съемок) небольшие неустойчивые скальные блоки могут либо искусственно увеличивать уязвимость прилегающих склонов, либо оставаться полностью незамеченными. В то же время показано, что данные высокого разрешения с беспилотных летательных аппаратов не заменяют данные спутниковых дистанционных зондирований Земли, а дополняют их, методы служат разным пространственным масштабам работ и исследовательским задачам. Результаты подтверждают, что спутниковые данные и данные с беспилотных летательных аппаратов должны быть комплементарны. Спутниковые данные подходят для регионального картирования модели поверхности земли (Landslide Susceptibility Mapping), а данные с беспилотных летательных аппаратов необходимы для детальных исследований отдельных участков, выделенных по спутниковым данным. Рекомендуется гибридная методология: космические данные – для первичного зонирования опасных зон, а беспилотные летательные аппараты – для детального изучения опасных участков.

**Ключевые слова:** картирование оползневой опасности, спутниковое дистанционное зондирование Земли, беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование Земли

**Для цитирования:** Гантимурова С.А., Паршин А.В., Хуан Г., Ли Ц., Цзин Ц., Залуцкий В.Т. Сравнительная оценка информативности спутниковых данных и данных с беспилотных летательных аппаратов при решении задач картирования оползневой опасности // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № 1. С. 96–110. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-8>. EDN: ERLVOT.



Original article

## Comparative assessment of satellite and unmanned aerial vehicles data for landslide susceptibility mapping

Svetlana A. Gantimurova<sup>a</sup>, Alexander V. Parshin<sup>b</sup>✉, Guanwen Huang<sup>c</sup>  
Junyuan Li<sup>d</sup>, Ce Jing<sup>e</sup>, Vyacheslav T. Zalutskii<sup>f</sup>

<sup>a,b,f</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>b</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>c-e</sup>Chang'an University, Xi'an, China

**Abstract.** Remote sensing methods enable the rapid study of large, hard-to-reach areas prone to hazardous gravitational geological processes (landslides, rockfalls). Regional mapping of high-risk landslide areas based on satellite remote sensing data is already well-developed. In recent decades, the theory and practice of using unmanned aerial vehicle (UAV) technologies for remote sensing have rapidly evolved. In both cases, multispectral survey data and digital elevation models are used to analyze geological risks. The purpose of the presented research is to compare the results of landslide susceptibility mapping based on available satellite data and unmanned aerial vehicles data and to identify the advantages and limitations of both methods. The key predictors for satellite data (slope angles, profile curvature, normalized difference vegetation index, wetness index and length-slope factor) were derived from ALOS AW3D30 digital elevation models and Sentinel-2 data. Unmanned aerial vehicle data were obtained using a photogrammetric method with multispectral cameras. To determine the weights of factors, the analytical hierarchy process was used through pairwise comparisons. Landslide susceptibility maps were generated for the same area using QGIS. The comparative analysis has clearly demonstrated how differences in input data resolution and survey methodology impact the predictive value of the results. The major finding is that due to resolution generalization (in the case of satellite imagery) small, unstable rock blocks can artificially increase the vulnerability of adjacent slopes, on the other hand, some small, but hazardous rocks can remain completely unnoticed. At the same time, it is shown that high-resolution data from unmanned aerial vehicles do not replace satellite remote sensing data, but rather complement it. The methods serve different spatial scales and research objectives. The results confirm that satellite data and data from unmanned aerial vehicles should be complementary. Satellite data are suitable for regional landslide susceptibility mapping, while data from unmanned aerial vehicles are essential for detailed studies of individual areas identified using satellite data. Therefore, a hybrid methodology is recommended: satellite data for the initial zoning of hazardous areas, and data from unmanned aerial vehicles for the detailed study of hazardous areas.

**Keywords:** landslide susceptibility mapping, satellite remote sensing, unmanned aerial vehicle, remote sensing

**For citation:** Gantimurova S.A., Parshin A.V., Huang G., Li J., Jing C., Zalutskii V.T. Comparative assessment of satellite and unmanned aerial vehicles data for landslide susceptibility mapping. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(1): 96-110. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2026-49-1-8>. EDN: ERLVOT.

### Введение

Оползни – это экзогенные геологические процессы, представляющие серьезную опасность не только для инфраструктуры, но зачастую и для жизни или здоровья людей. Оползни, обвалы и камнепады в хозяйственно освоенных районах могут привести к значительным финансовым потерям. Обнаружение и картирование оползневых процессов в разных масштабах – важное направление фундаментальных и прикладных исследований. Картирование оползневой опасности LSM (Landslide Susceptibility Mapping) – важный метод выделения оползнеопасных территорий, основанный на факторном анализе вклада различных топографических, геологических, гидрологических, ландшафтно-географических параметров территории [1, 2]. Итоговые карты позволяют разрабатывать упреждающие стратегии

по снижению экономических потерь и угроз населению.

Основными источниками данных для LSM являются инвентаризационные данные об уже известных оползнях, данные обуславливающих факторов (геолого-географические и топографические признаки) и триггерных факторов (осадки, сейсмическая активность). Эти данные можно получить в результате полевых обследований, используя существующие геопространственные базы данных, или средствами дистанционного зондирования Земли.

Традиционное картирование оползневой опасности опирается на полевые инженерно-геологические обследования и ручную интерпретацию топографических данных. Проведение пешеходных полевых работ обеспечивает высокую точность и детальность обследований, но весьма затруднено на больших участках, особенно в труднодоступных районах [3].



Ряд преимуществ перед наземными обследованиями неустойчивых склонов представляют методы дистанционного зондирования Земли [3–5]. Так, спутниковые данные широко применяются для LSM благодаря большому охвату, мультитемпоральности изображений и доступности бесплатных данных до 10 м пространственного разрешения (например, Sentinel-2) [6–9]. Доступны и глобальные цифровые модели рельефа, содержащие геоморфологическую информацию; к наиболее часто используемым относятся ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [10]. Наибольшую из открытых глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) детальность представляет набор данных AW3D30 с пространственным разрешением 30 м. Эта ЦМР получена на основе данных стереокартирования сенсором PRISM (Panchromatic Remote sensing Instrument for Stereo Mapping) с борта спутника ALOS (Advanced Land Observing Satellite) [10, 11]. При этом следует отметить, что, хотя изменения рельефа происходят медленно, изучение экзогенных геологических процессов, которые могут протекать быстро, требует актуальных данных. Кроме того, данные спутникового дистанционного зондирования Земли имеют ряд других ограничений – атмосферные помехи, ограниченная периодичность сбора данных [12].

Мультиспектральные и радиолокационные спутниковые данные дистанционного зондирования часто используются для изучения опасных гравитационных процессов на региональном уровне масштаба исследований, поскольку их главное преимущество заключается в доступности данных на любую территорию. Однако очевидно ограничение таких данных, связанное с невысоким пространственным разрешением, и оно наиболее существенно для участков с очень крутыми склонами. Поэтому для повышения качества и точности карт рисков и минимизации будущих последствий необходимы детализирующие инструменты прогнозного моделирования и проверки. Безусловно, существует множество коммерческих спутниковых снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, которые могут обеспечить необходимую пространственную детализацию. Существенной проблемой использования таких данных (разрешением 0,3–0,5 м) является

так называемый избыточный объем данных: данные дистанционного зондирования Земли распространяются не в виде отдельных небольших полигонов, а в виде минимальных сцен – например 25 или даже 100 км<sup>2</sup>. В результате, если интересующий участок с опасной зоной представляет собой линейный объект (например, оползневой склон или борозду) площадью всего 0,5 км<sup>2</sup>, оплата в любом случае требуется за всю сцену, независимо от фактической площади области интереса, что приводит к сильному удорожанию данных – в 50–200 раз по сравнению с фактической стоимостью площади обследования [13]. Это еще один очевидный недостаток данных спутниковых систем в сравнении с обследованиями отдельных участков – пешеходных, или же обследованиями с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), при которых оператор несет расходы только на точно определенную область интереса.

В последние годы произошло быстрое развитие недорогих и малогабаритных БПЛА в сочетании со снижением стоимости и размеров традиционных датчиков (фотокамер, приемников спутниковых координат, лидаров), что привело к появлению инновационных и перспективных направлений в области дистанционного зондирования окружающей среды, моделирования поверхности и мониторинга [4] – теперь не спутниковых. Дистанционное зондирование Земли с использованием БПЛА предлагает ряд очевидных преимуществ, включая возможность съемки в любое нужное время, гибкое планирование проектов обследований, самое высокое пространственное разрешение и возможность сбора информации на сложнопроходимые участки и даже в опасных для людей условиях без рисков для них и для окружающей среды [5]. БПЛА эффективны для проведения детальных исследований небольших территорий, но менее пригодны для регионального картирования. Однако для линейных объектов, таких как трубопроводы, дороги или береговые линии, БПЛА могут быть весьма подходящим и эффективным инструментом для мониторинга и инспекции.

Таким образом, оба источника данных о поверхности Земли имеют ряд потенциальных преимуществ и ограничений. Выбор зависит от многих факторов и целей исследования, и в этом отношении в современных литературных источниках существует определенный



пробел. Так, хотя многие исследования посвящены качеству данных и межсистемному сравнению между несколькими космическими системами (например, ASTER, SRTM, ALOS AW3D30), подавляющее большинство сосредоточено на спутниковых снимках среднего или высокого разрешения [10, 11]. Еще менее разработанной темой является сравнение спутниковых данных с данными БПЛА высокого разрешения. Исследования, в которых такое сравнение осуществляется в рамках единого методологического подхода к картированию подверженности оползням, остаются исключительно редкими. В связи с этим авторы надеются, что данная работа может быть полезна широкому кругу специалистов, поскольку в ней приведены результаты сравнения наиболее доступных на практике спутниковых данных среднего разрешения и данных БПЛА-мультиспектральной аэрофотосъемки высокого разрешения в типичном кейсе оценки рисков оползней на реальном объекте.

### Материалы и методы исследования

*Область исследования.* Кругобайкальская железная дорога расположена в Иркутской области России; ее строительство началось в конце XIX в. В настоящее время она используется преимущественно в туристических целях. Железнодорожные пути проложены на узком, частично природном, частично антропогенном откосе над озером Байкал, с другой стороны путей находятся крутые склоны, достигающие угла в 80°. При строительстве Кругобайкальской железной дороги применялись взрывные работы, которые нарушали естественный рельеф и увеличивали вероятность оползней и лавин.

Байкальский регион в целом характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями. Так, непосредственно вдоль берегов озера Байкал, на 80-километровом участке Кругобайкальской железной дороги расположен Иркутский блок Шарыжалгайского выступа Сибирской платформы. Он сложен метаморфизованными магматическими и осадочными породами: гнейсами, метабазитами, сланцами, мраморами и кварцитами. Степень метаморфизма варьируется от амфиболитовой до гранулитовой фации. Возраст архейских пород составляет 3,9–2,9 млрд лет, а палеопротерозойских – 3,1–2,4 млрд лет. Для региона характерно полициклическое развитие эндогенных процессов. Байкальский регион расположен

в зоне вечной мерзлоты (толщина мерзлого грунта на побережье достигает 10 м). Рельеф эрозионно-денудационный, с узкими долинами и ущельями, а побережье структурно-абразивное. Здесь активно развиваются опасные геоморфологические процессы: линейная эрозия и гравитационно-склоновые явления.

Климат умеренный, резко континентальный: зимы холодные и длинные (6–7 месяцев, со средней температурой января минус 25–30 °С и абсолютным минимумом минус 61 °С), а лето теплое, но короткое (от 15 до 20 °С). Переходные сезоны короткие. Весна и начало лета сухие, большая часть осадков выпадает во второй половине лета (в 2–3 раза больше летом, чем зимой). Много солнечных дней. Снежный покров к началу марта не превышает 20 см, а на подветренных склонах – более 50 см.

Почвы разнообразные: преобладают мерзлотные таежные и горные подзолистые почвы, а в верхних горах встречаются каменистые альпийские тундровые почвы. Растительность состоит преимущественно из хвойных и мелколиственных лесов (лиственница, сосна, кедр, ель, пихта и береза).

Ранее картирование современных оползневых процессов на исследуемой территории проводилось преимущественно в мелком масштабе. Имеются государственные инженерно-геологические карты селеопасных районов южной оконечности Байкала масштаба 1:200000 (листы М-48-2, М-48-3, М-48-4, 2008 г.), а также тематическая интерпретация данных Landsat, выполненная в рамках научных исследований с разрешением 30 м [14]. Такой уровень детализации картирования может быть достаточным для целей регионального планирования. Однако для изучения небольших опасных зон и точного картирования пространственного распределения оползней, как будет показано далее, необходимы исследования в более крупном масштабе.

*Спутниковые данные.* В данной работе использовался типичный набор актуальных открыто распространяемых данных спутниковых съемок. Морфометрические данные для интересующей области были получены из ЦМР AW3D30 с разрешением 30 м, созданной на основе стереоизображений сенсора PRISM спутника ALOS (рис. 1). Кроме того, для расчета спектральных индексов и визуальной интерпретации исследуемой области использовались изображения спутниковой системы Sentinel-2 с разрешением до 10 м, включая

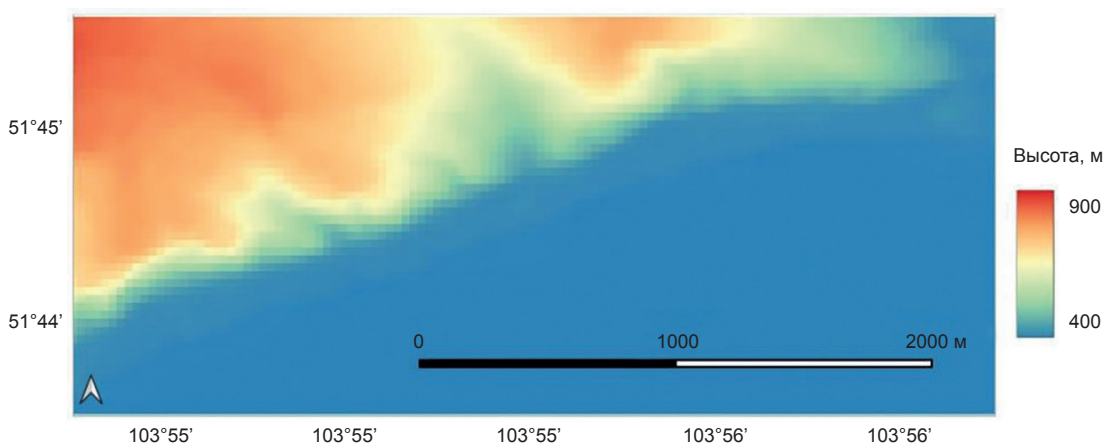


красный, синий, зеленый и ближний инфракрасный диапазоны (композит Red-Green-Blue, RGB-композит) (рис. 2).

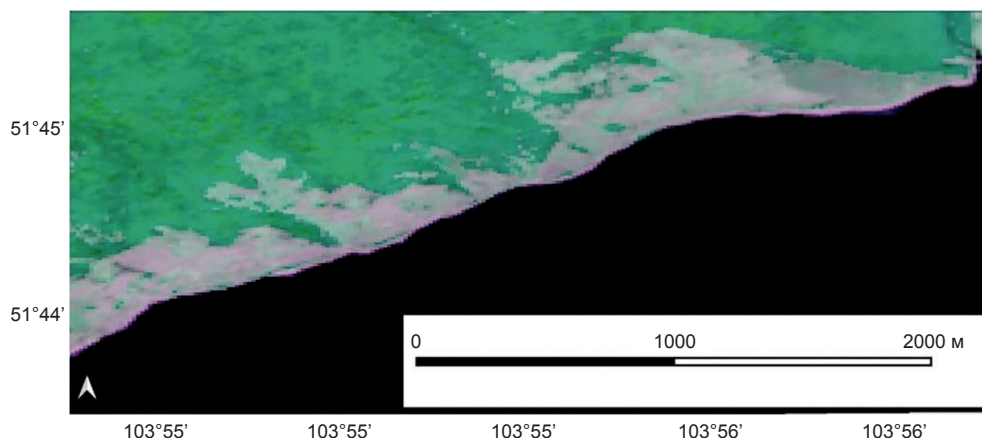
**Данные с беспилотных летательных аппаратов.** Для получения детальных геопространственных данных, необходимых для создания ЦМР и расчета параметров, связанных с риском оползней, использовался гексакоптер с установленными мультиспектральными камерами семейства MAPIR 2. Съёмка проводилась на высоте 125 м над землей с двух углов съёмки: 45 и 90 (надир). Полученные изображения имеют разрешение 5 см на пиксель. Съёмка проводилась по сети параллельных маршрутов, обеспечивая продольное перекрытие 70–80 % и поперечное перекрытие 60–70 % между кадрами. Такой подход обеспечил корректную 3D-реконструкцию местности. После первоначальной обработки данных съёмки с БПЛА была проведена фотограмметрическая обработка полученных изображений с использованием алгоритма Structure

from Motion в среде OpenDroneMap. Полученные результаты включают: ЦМР (рис. 3), ортомозаику в видимом (рис. 4) диапазоне спектра и дополнительно в инфракрасном (808 нм), облако точек, текстурированную модель (рис. 5).

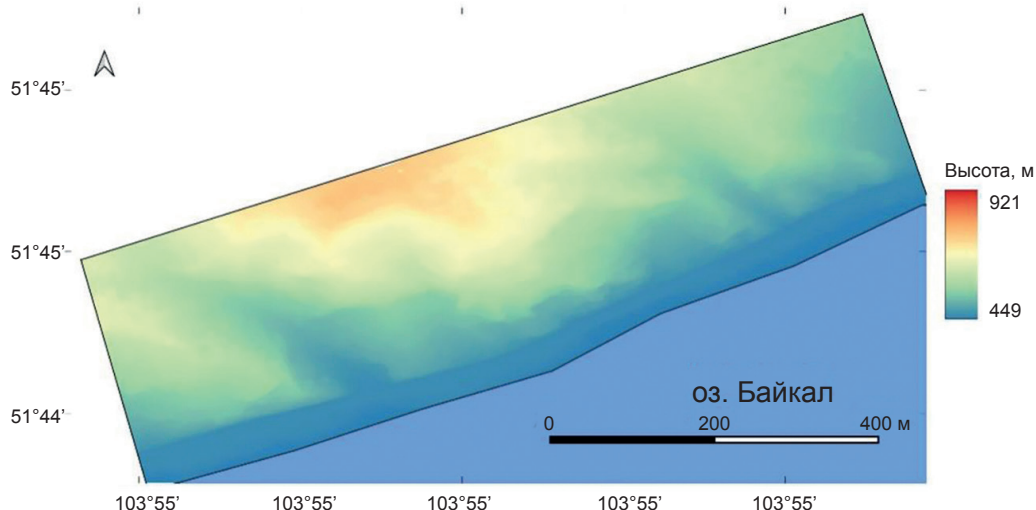
**Методы.** Картирование оползневой опасности (LSM) с использованием метода аналитической иерархии (АНР, Analytic Hierarchy Process) является популярным и надежным методом принятия решений на основе технологий геоинформационных систем, основанным на многокритериальном анализе, используемом для выявления районов, подверженных оползням [3, 15–18]. Метод АНР определяет относительные веса причинных факторов посредством попарных сравнений. Типичными переменными для моделей LSM являются высота над уровнем моря, угол наклона склона, экспозиция, профильная кривизна, литология, расстояние до дорог, расстояние до рек и параметры ландшафтной обстанов-



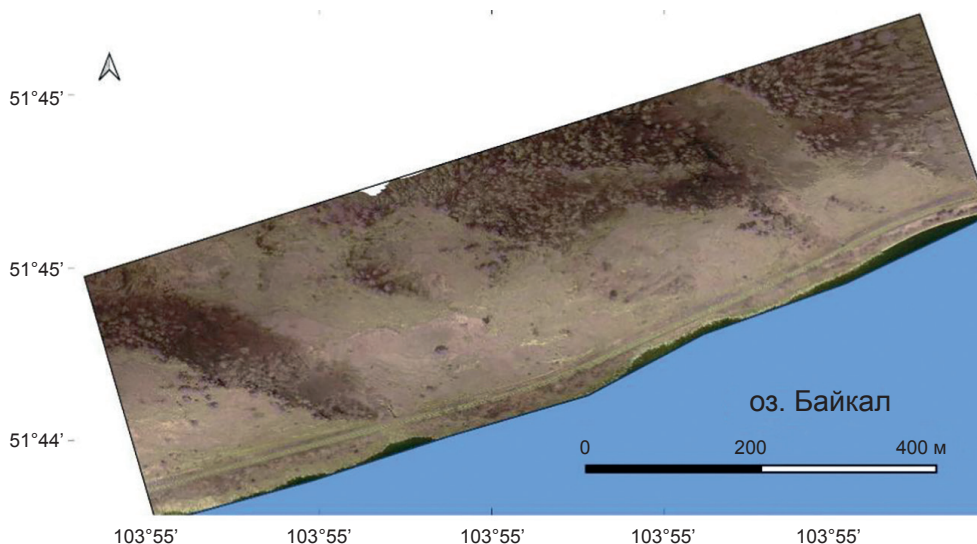
**Рис. 1. Цифровая модель рельефа участка по данным AW3D30**  
**Fig. 1. Digital elevation model of the study area based on AW3D30 data**



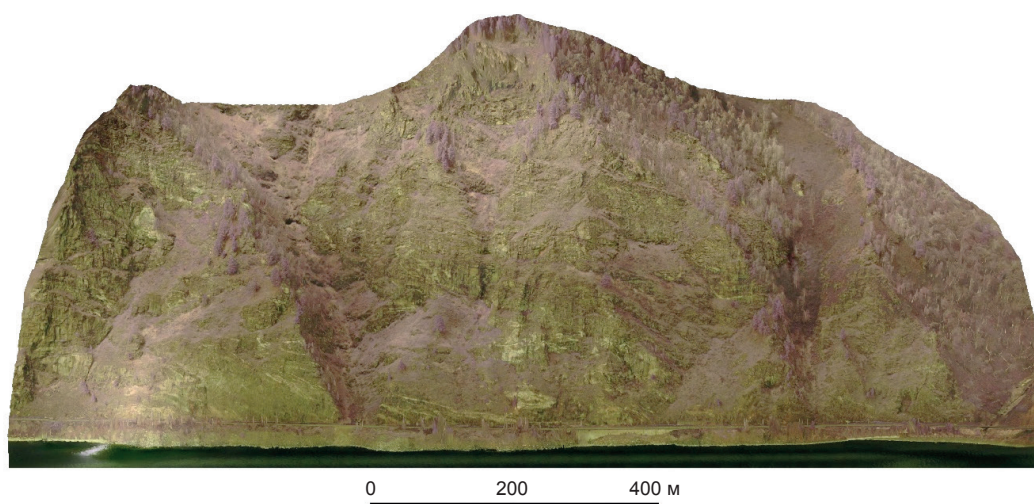
**Рис. 2. RGB-композит по данным спутниковой системы Sentinel-2**  
**Fig. 2. RGB composite based on Sentinel-2 satellite system data**



**Рис. 3. Цифровая модель рельефа по данным съемки с беспилотного летательного аппарата**  
**Fig. 3. Digital elevation model derived from unmanned aerial vehicle imagery**



**Рис. 4. Ортофотоплан (по данным съемки с беспилотного летательного аппарата)**  
**Fig. 4. Orthomosaic (derived from unmanned aerial vehicle imagery)**



**Рис. 5. Вид спереди на текстурированную модель участка работ**  
**(по данным съемки с беспилотного летательного аппарата)**  
**Fig. 5. Front view of the textured site model (derived from unmanned aerial vehicle imagery)**



ки [19]. В данной работе для реализации LSM было вычислено пять факторов, влияющих на устойчивость, на основе данных одинаково вычисляемых полученных и на основе данных космических дистанционных зондирований, а также на основе данных БПЛА-дистанционных зондирований (рис. 6, 7):

1. Параметр «Угол уклона рельефа» напрямую влияет на гравитационное сдвиговое напряжение, скорость стока и устойчивость грунта/горных пород [17]. Возникновение камнепадов и оползней напрямую связано с крутизной склона, поэтому угол уклона склона является ключевым фактором в моделировании. По мере увеличения угла наклона склона возрастает и сила гравитации, действующая на горные породы, что повышает вероятность обрушения.

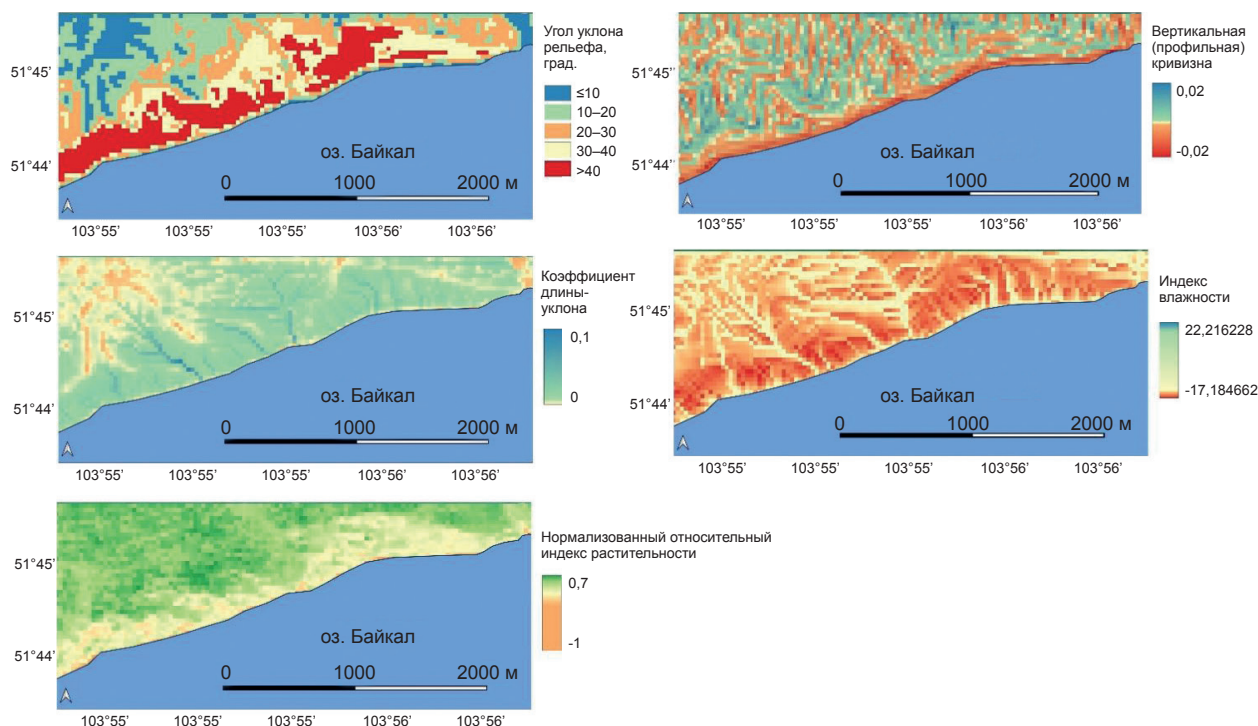
2. Параметр «Вертикальная (профильная) кривизна» отрицателен при увеличении уклона вниз по склону (выпуклый профиль потока, типичный для верхних участков склонов) и положителен при уменьшении уклона вниз по склону (вогнутый, типичный для нижних участков склонов). Исследования показывают, что, хотя вогнутые склоны могут быть зонами меньшей нестабильности, камнепады чаще встречаются на выпуклых склонах. Для склонов выпуклой формы поворотный угол обычно оказывает негативное влияние на стабиль-

ность, особенно когда угол относительно невелик, а более тонкая открытая масса склона значительно снижает его стабильность [20].

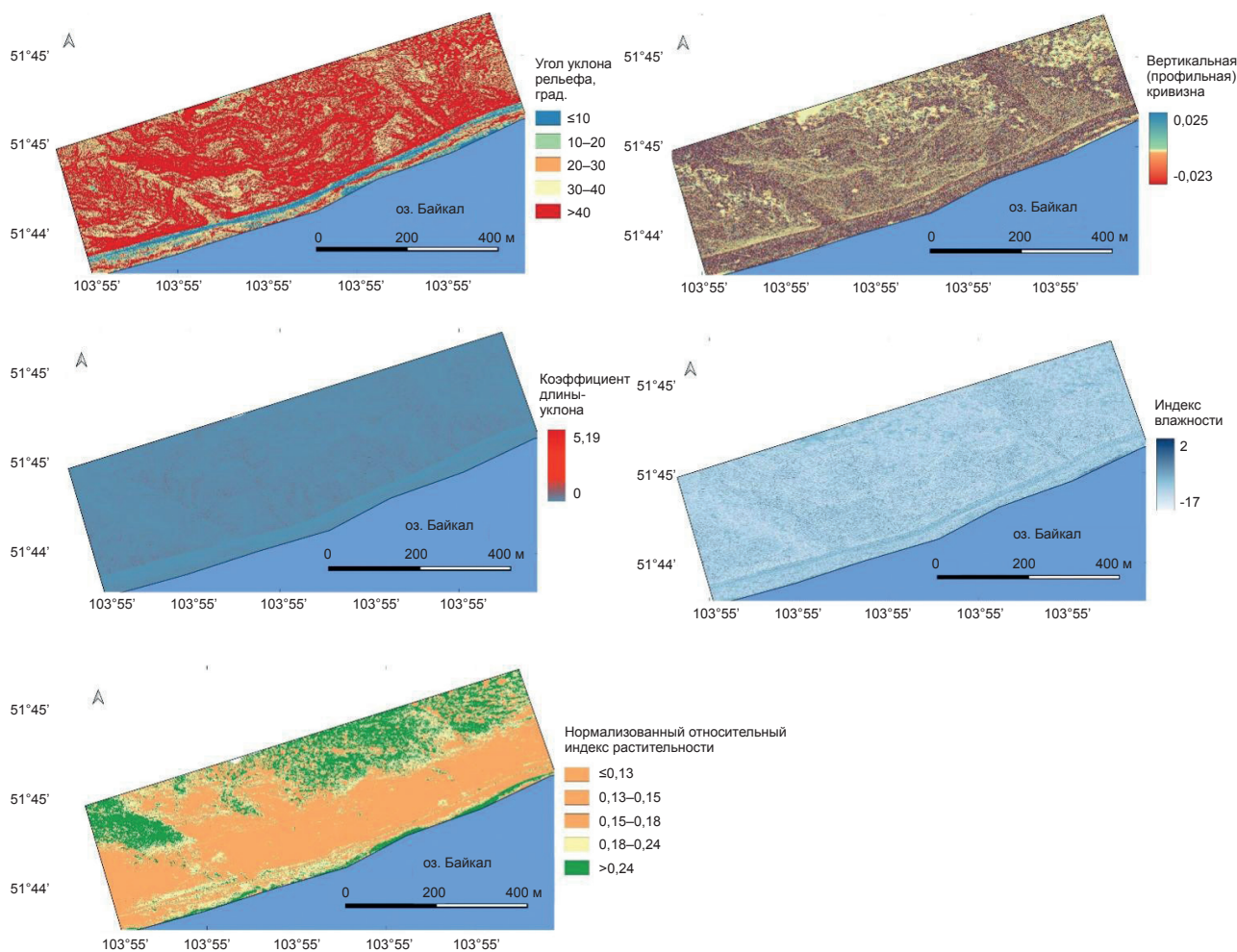
3. Параметр «LSF (Коэффициент длины-уклона)» отражает силу поверхностного стока и влияние топографии на риск эрозии почвы. Он обычно используется в моделях оценки эрозии почвы (например, USLE и RUSLE). Чем длиннее и круче склон, тем выше скорость и объем поверхностного стока и тем больше теряется почвы [21].

4. Параметр «WI (Индекс влажности)» служит индикатором насыщенности почвы; он рассчитывается как натуральный логарифм отношения площади водосбора к уклону. Более высокое значение индекса коррелирует с увеличением содержания влаги в почве. Кроме того, индекс влажности указывает направления дренажа, которые совпадают с предпочтительными путями оползней [3].

5. Параметр «NDVI (Нормализованный относительный индекс растительности)» – популярный индекс биомассы растительности, который используется для определения участков, покрытых растительностью, и выделения голый почвы. Фактор растительного покрова имеет важное значение, поскольку прочность почвы повышается за счет наличия корней и связывания слоев почвы. Таким образом, по-



**Рис. 6. Карты факторов, влияющих на условия окружающей среды, полученные на основе спутниковых данных**  
**Fig. 6. Satellite-derived maps of environmental factors**



**Рис. 7. Карты факторов, влияющих на условия полета, полученные на основе данных съемки с беспилотного летательного аппарата**  
**Fig. 7. UAV-derived maps of flight environment factors**

верхности, не покрытые растительностью, более подвержены оползням [22].

Авторы использовали одни и те же модели АНР для анализа данных, полученных со спутников и с помощью БПЛА-съемки. Для

определения того, насколько один фактор важнее другого, было проведено попарное сравнение (табл. 1).

Учитываемые факторы имеют разные шкалы, и перед расчетом взвешенной суммы

**Таблица 1. Матрица попарного сравнения и весовые коэффициенты факторов**  
**Table 1. Pairwise comparison matrix and factor weighting coefficients**

Фактор	Угол уклона рельефа	Нормализованный относительный индекс растительности	Индекс влажности	Вертикальная (профильная) кривизна	Коэффициент длины-уклона	Весовой коэффициент	Отношение, %
Угол уклона рельефа	1,00	3,00	4,00	5,00	6,00	0,48	48
Нормализованный относительный индекс растительности	0,33	1,00	2,00	3,00	4,00	0,21	21
Индекс влажности	0,25	0,50	1,00	2,00	3,00	0,13	13
Вертикальная (профильная) кривизна	0,20	0,33	0,50	1,00	2,00	0,09	9
Коэффициент длины-уклона	0,17	0,25	0,33	0,50	1,00	0,06	6



необходимо нормализовать значения. Для этого была проведена переклассификация в соответствии с табл. 2.

Окончательный расчет был выполнен в системе QGIS с использованием следующего уравнения:

$$\begin{aligned} \text{Susceptibility Index} = & (\text{Slope}_{\text{Weight}} \times \text{Slope}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{LSF}_{\text{Weight}} \times \text{LSF}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{Curvature}_{\text{Weight}} \times \text{Curvature}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{Wetness}_{\text{Weight}} \times \text{Wetness}_{\text{Reclass}}) + \\ & + (\text{NDVI}_{\text{Weight}} \times \text{NDVI}_{\text{Reclass}}). \end{aligned}$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Была создана тематическая карта пространственного распределения оползневой опасности, которую затем разделили на пять классов (рис. 8, 9).

При сравнении двух итоговых карт оползневой опасности (построенных по данным спутниковой съемки и БПЛА-съемки) было выявлено, что зоны, выделенные как опасные, пространственно расположены аналогично, но их площадь существенно отличается. Очевидно, причиной этого несоответствия является разное разрешение ЦМР. Недостаточное пространственное разрешение спутниковых данных ограничивает точное определение границ опасных зон, спутниковая ЦМР не позволяет выявлять резкие изменения рельефа, которые обычно указывают на нестабильные участки склонов, поскольку она усредняет истинные значения отметок рельефа в пределах участка 30×30 м на один пиксель итогового раstra.

Таким образом, доступные глобальные спутниковые ЦМР, имеющие разрешение не

Таблица 2. Принципы переклассификации  
Table 2. Principles of reclassification

Фактор	Диапазон классов	Показатель восприимчивости (1–5)
Угол уклона рельефа	0–10° (равнина)	1 (низкий риск)
	10–20°	2
	20–30°	3
	30–40°	4
	>40° (крутой)	5 (высокий риск)
Нормализованный относительный индекс растительности	Высокая степень озеленения (густой лес)	1 (низкий риск – защита)
	Низкая степень озеленения / голая почва	5 (высокий риск)
Индекс влажности	Низкий (сухо)	1 (низкий риск)
	Высокий (насыщенность влагой)	5 (высокий риск – нестабильность)
Вертикальная (профильная) кривизна	Выпуклый (расходящийся поток)	1
	Равнина	3
	Вогнутый (сходящийся поток / эрозия)	5 (высокий риск)
Коэффициент длины-уклона	Низкие значения (экономичный)	1
	Высокие значения (высокозатратный)	5 (высокий риск)

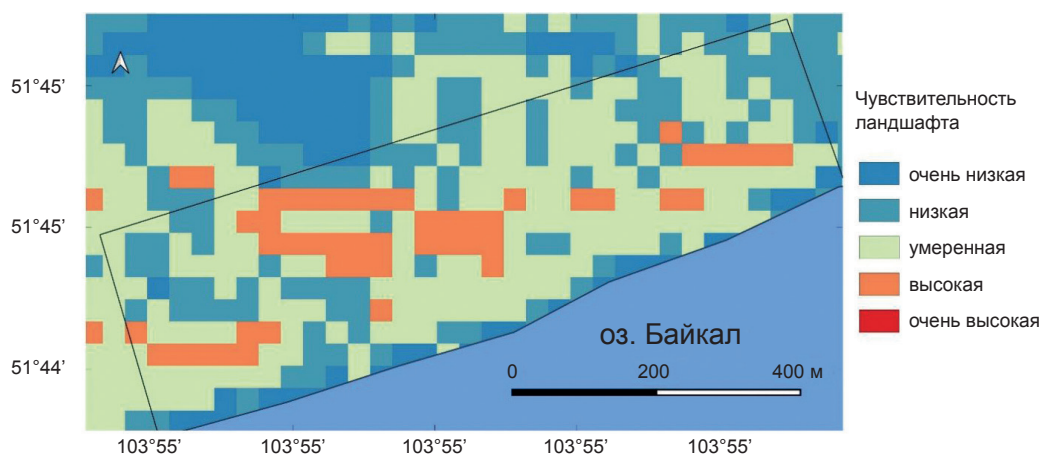
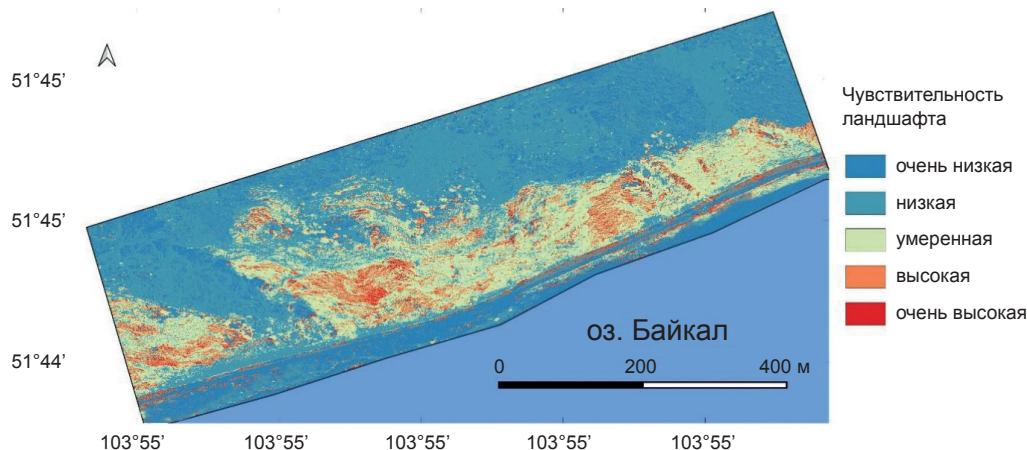


Рис. 8. Карта рисков оползневой опасности на основе спутниковых данных  
Fig. 8. Satellite-derived landslide susceptibility map



**Рис. 9. Карта рисков оползневой опасности на основе данных с беспилотного летательного аппарата**  
**Fig. 9. UAV-derived landslide susceptibility map**

лучше 30 м на пиксель, вполне достаточны для выделения опасных участков в региональном масштабе, они позволяют достоверно картировать опасные склоны, занимающие площадь в несколько пикселей. Но они недостаточно детальны для изучения опасных участков и выделения в их пределах конкретных опасных зон. Из-за обобщения, связанного с разрешением, небольшие нестабильные блоки горных пород могут зависеть оценку опасности прилегающей области склона или, наоборот, пропустить опасную зону. В то же время на рис. 9 отлично видны небольшие структуры и даже отдельные глыбы, формирующие опасность камнепадов.

Также на основе спутниковых данных невозможно проектировать защитные сооружения, поскольку для этого требуется расчет точных траекторий падающих блоков, что возможно по представленной в работе БПЛА-ЦМР с разрешением не менее 0,5 м. Аналогично оценка объема предупредительных оборок каменного материала требует точных измерений объемов во избежание ненужных затрат.

Получение высокоточных данных с БПЛА вполне оправдано, когда необходимо не только определить риски развития опасных процессов на склоне в целом, но и точно установить пространственные границы зон риска и предоставить исчерпывающие надежные данные для проектирования мер по предотвращению оползней.

Еще одним преимуществом БПЛА-фотограмметрии является возможность создания детальной 3D-модели склона. Наблюдение за склоном не только с надира, но и с других плоскостей позволяет идентифицировать неустойчивые каменные блоки, осыпи и обломки

горных пород у подножия склона, что указывает на прошлые камнепады. Фронтальный вид склона также позволяет рассчитать степень растрескивания горных пород – важный показатель при оценке нестабильности скалисто-го склона [23]. Кроме того, когда необходимо определить потенциальную траекторию камнепадов, необходима подробная и точная модель склона. Следовательно, в то время как спутниковые данные служат инструментом предварительной оценки, данные БПЛА необходимы для любой последующей фазы проектирования мер по предотвращению оползней.

Таким образом, наглядно показано, что спутниковые данные среднего разрешения и данные БПЛА высокого разрешения не являются взаимоисключающими, а, скорее, служат для разных пространственных масштабов и исследовательских вопросов. Спутниковые данные отлично подходят для региональных исследований и зонирования, в то время как данные БПЛА полезны для детального картирования в локальном масштабе.

### Заключение

В данном исследовании представлено сравнение доступных спутниковых данных невысокого пространственного разрешения (ALOS AW3D30, Sentinel-2) с данными высокого разрешения, полученными с помощью БПЛА, на примере реального кейса картирования оползневой опасности (LSM). Как и ожидалось, разрешение данных сильно влияет на результаты LSM.

Ключевой вывод заключается в том, что, хотя оба метода корректно пространственно определяют схожие опасные зоны, площадь



и границы этих зон существенно различаются из-за обобщения, связанного с недостаточным разрешением доступных спутниковых данных. В частности, данные цифровой модели рельефа с разрешением 30 м переоценивают зоны умеренной подверженности и пропускают небольшие опасные участки, которые четко видны при обследовании с помощью БПЛА.

В целом полученные результаты подтверждают мнение о том, что спутниковые данные и данные БПЛА дополняют друг друга. В связи с этим можно рекомендовать гибридные подходы, при которых данные, полученные из космоса, используются для первичного зонирования, а данные БПЛА – для точного исследования локальных участков.

#### Список источников

1. Ado M., Amitab K., Maji A.K., Jasińska E., Gono R., Leonowicz Z., et al. Landslide susceptibility mapping using machine learning: a literature survey // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 13. P. 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>. EDN: WPDGQC.
2. Sarkar S., Kanungo D. An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004. Vol. 70. Iss. 5. P. 617–625. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.617>.
3. Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal railway in Russia using UAV data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Iss. 18. C. 3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.
4. Casagli N., Frodella W., Morelli S., Tofani V., Ciampalini A., Intrieri E., et al. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning // *Geoenvironmental Disasters*. 2017. Vol. 4. Iss. 1. P. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0073-1>. EDN: XBSOCI.
5. Rossi G., Tanteri L., Tofani V., Vannocci P., Moretti S., Casagli N. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization // *Landslides*. 2018. Vol. 15. Iss. 5. P. 1045–1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>. EDN: KNTROI.
6. Ghorbanzadeh O., Didehban K., Rasouli H., Kamran K.V., Feizizadeh B., Blaschke T. An application of Sentinel-1, Sentinel-2, and GNSS data for landslide susceptibility mapping // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9. Iss. 10. P. 561. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100561>. EDN: IASVNL.
7. Kyriou A., Nikolakopoulos K. Assessing the suitability of Sentinel-1 data for landslide mapping // *European Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 51. Iss. 1. P. 402–411. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444944>.
8. Lu P., Shi W., Wang Q., Li Z., Qin Y., Fan X. Co-seismic landslide mapping using Sentinel-2 10-m fused NIR narrow, red-edge, and SWIR bands // *Landslides*. 2021. Vol. 18. Iss. 6. P. 2017–2037. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01636-2>. EDN: HYQURY.
9. Novellino A., Pennington C., Leeming K., Taylor S., Alvarez I.G., McAllister E., et al. Mapping landslides from space: a review // *Landslides*. 2024. Vol. 21. Iss. 5. P. 1041–1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x>. EDN: URVNZQ.
10. Uuemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Knoch A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM) // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Iss. 21. P. 3482. <https://doi.org/10.3390/rs12213482>. EDN: BPXCMY.
11. González-Moradas M.R., Viveen W., Vidal-Villalobos R.A., Villegas-Lanza J.C. A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes // *Catena*. 2023. Vol. 228. Iss. 3. P. 107160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>. EDN: OHTWNG.
12. Sun J., Yuan G., Song L., Zhang H. Unmanned aerial vehicles (UAVs) in landslide investigation and monitoring: a review // *Drones*. 2024. Vol. 8. Iss. 1. P. 30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>. EDN: ZURRVW.
13. Sozzi M., Kayad A., Gobbo S., Cogato A., Sartori L., Marinello F. Economic comparison of satellite, plane and UAV-acquired NDVI images for site-specific nitrogen application: observations from Italy // *Agronomy*. 2021. Vol. 11. Iss. 11. P. 2098. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112098>. EDN: UYXWVG.
14. Абрамова З.В., Литвинцева З.О. Картографирование современных экзогенных процессов центральной экологической зоны Байкальской природной территории // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. 2023. Т. 44. С. 3–17. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.3>. EDN: YNLLHJ.
15. Chandra N., Elizabeth, Choudhury S., Vaidya H. Integrated spatial landslide risk assessment for population and infrastructure in Tehri, Garhwal Himalayas, India // *Geological Journal*. 2026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gj.70251>.
16. Das M., Gautam G.K., Jain S., Bhat M.F., Mankar A.K., Koner R. A comparative analysis of AHP, FR, AHP-FR and LR models for landslide susceptibility mapping in Sikkim Himalaya, India // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2026. Vol. 51. Iss. 2. P. e70257. <https://doi.org/10.1002/esp.70257>.
17. Sisay T., Tesfaye G., Jothimani M., Reda T.M., Tadese A. Landslide susceptibility mapping using combined geospatial, FR and AHP models: a case study from Ethiopia's highlands // *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. Iss. 1. P. 474. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00730-4>. EDN: QFZAIK.
18. Sutawane S., Mitra S. Landslide susceptibility analysis for Irshalwadi, Maharashtra by using analytical hierarchy process on satellite image // *Urbanisation and climate change: strategies for sustainable cities through geospatial technologies: 18th DGS International conference*. Hyderabad: Osmania University, 2023.



19. Mohd M.H., Azman F.N.U.Z., Jusoh A., Rahman M.A.A. Landslide susceptibility mapping at Lebir and Galas River Basins after extreme flood event using weights of evidence // *Journal of Sustainability Science and Management*. 2019. Vol. 14. Iss. 2. P. 103–115.
20. Zhou Y., Qi S.-C., Fan G., Chen M.-L., Zhou J.-W. Topographic effects on three-dimensional slope stability for fluctuating water conditions using numerical analysis // *Water*. 2020. Vol. 12. Iss. 2. P. 615. <https://doi.org/10.3390/w12020615>. EDN: CICDCT.
21. Schmidt S., Tresch S., Meusburger K. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands // *MethodsX*. 2019. Vol. 6. P. 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.004>. EDN: QIUVR.
22. Kalsnes B., Capobianco V. Use of vegetation for landslide risk mitigation // *Climate adaptation modelling*. Cham: Springer, 2022. P. 77–85. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4_10).
23. Gantimurova S., Parshin A. Combined methodology for rockfall susceptibility mapping using UAV imagery data // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 1. P. 177. <https://doi.org/10.3390/rs16010177>. EDN: PIEXRI.

### References

1. Ado M., Amitab K., Maji A.K., Jasińska E., Gono R., Leonowicz Z., et al. Landslide susceptibility mapping using machine learning: a literature survey. *Remote Sensing*. 2022;14(13):3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>. EDN: WPDGQC.
2. Sarkar S., Kanungo D. An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004;70(5):617-625. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.617>.
3. Gantimurova S., Parshin A., Erofeev V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal railway in Russia using UAV data. *Remote Sensing*. 2021;13(18):3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.
4. Casagli N., Frodella W., Morelli S., Tofani V., Ciampalini A., Intrieri E., et al. Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*. 2017;4(1):1-23. <https://doi.org/10.1186/s40677-017-0073-1>. EDN: XBSOCI.
5. Rossi G., Tanteri L., Tofani V., Vannocci P., Moretti S., Casagli N. Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *Landslides*. 2018;15(5):1045-1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>. EDN: KNTROI.
6. Ghorbanzadeh O., Didehban K., Rasouli H., Kamran K.V., Feizizadeh B., Blaschke T. An application of Sentinel-1, Sentinel-2, and GNSS data for landslide susceptibility mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020;9(10):561. <https://doi.org/10.3390/ijgi9100561>. EDN: IASVNL.
7. Kyriou A., Nikolakopoulos K. Assessing the suitability of Sentinel-1 data for landslide mapping. *European Journal of Remote Sensing*. 2018;51(1):402-411. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444944>.
8. Lu P., Shi W., Wang Q., Li Z., Qin Y., Fan X. Co-seismic landslide mapping using Sentinel-2 10-m fused NIR narrow, red-edge, and SWIR bands. *Landslides*. 2021;18(6):2017-2037. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01636-2>. EDN: HYQURY.
9. Novellino A., Pennington C., Leeming K., Taylor S., Alvarez I.G., McAllister E., et al. Mapping landslides from space: a review. *Landslides*. 2024;21(5):1041-1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x>. EDN: URVNZQ.
10. Uemaa E., Ahi S., Montibeller B., Muru M., Knoch A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing*. 2020;12(21):3482. <https://doi.org/10.3390/rs12213482>. EDN: BPXCMY.
11. González-Moradas M.R., Viveen W., Vidal-Villalobos R.A., Villegas-Lanza J.C. A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes. *Catena*. 2023;228(3):107160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107160>. EDN: OHTWNG.
12. Sun J., Yuan G., Song L., Zhang H. Unmanned aerial vehicles (UAVs) in landslide investigation and monitoring: a review. *Drones*. 2024;8(1):30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>. EDN: ZURRVW.
13. Sozzi M., Kayad A., Gobbo S., Cogato A., Sartori L., Marinello F. Economic comparison of satellite, plane and uav-acquired NDVI images for site-specific nitrogen application: observations from Italy. *Agronomy*. 2021;11(11):2098. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112098>. EDN: UYXWVG.
14. Abramova Z.V., Litvintseva Z.O. Mapping of modern exogenous processes of the central ecological zone of the Baikal natural territory. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2023;44:3-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.44.3>. EDN: YNLLHJ.
15. Chandra N., Elizabeth, Choudhury S., Vaidya H. Integrated spatial landslide risk assessment for population and infrastructure in Tehri, Garhwal Himalayas, India. *Geological Journal*. 2026. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gj.70251>.
16. Das M., Gautam G.K., Jain S., Bhat M.F., Mankar A.K., Koner R. A comparative analysis of AHP, FR, AHP-FR and LR models for landslide susceptibility mapping in Sikkim Himalaya, India. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2026;51(2):e70257. <https://doi.org/10.1002/esp.70257>.
17. Sisay T., Tesfaye G., Jothimani M., Reda T.M., Tadese A. Landslide susceptibility mapping using combined geospatial, FR and AHP models: a case study from Ethiopia's highlands. *Discover Sustainability*. 2024;5(1):474. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00730-4>. EDN: QFZAIK.
18. Sutawane S., Mitra S. Landslide susceptibility analysis for Irshalwadi, Maharashtra by using analytical hierarchy process on satellite image. In: *Urbanisation and climate change: strategies for sustainable cities through geospatial technologies: 18th DGS International conference*. Hyderabad: Osmania University; 2023.



19. Mohd M.H., Azman F.N.U.Z., Jusoh A., Rahman M.A.A. Landslide susceptibility mapping at Lebir and Galas River Basins after extreme flood event using weights of evidence. *Journal of Sustainability Science and Management*. 2019;14(2):103-115.

20. Zhou Y., Qi S.-C., Fan G., Chen M.-L., Zhou J.-W. Topographic effects on three-dimensional slope stability for fluctuating water conditions using numerical analysis. *Water*. 2020;12(2):615. <https://doi.org/10.3390/w12020615>. EDN: CICDCT.

21. Schmidt S., Tresch S., Meusburger K. Modification of the RUSLE slope length and steepness factor (LS-factor) based on rainfall experiments at steep alpine grasslands. *MethodsX*. 2019;6:219-229. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.004>. EDN: QIUVR.

22. Kalsnes B., Capobianco V. Use of vegetation for landslide risk mitigation. *Climate adaptation modelling*. Cham: Springer; 2022, p. 77-85. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86211-4_10).

23. Gantimurova S., Parshin A. Combined methodology for rockfall susceptibility mapping using UAV imagery data. *Remote Sensing*. 2024;16(1):177. <https://doi.org/10.3390/rs16010177>. EDN: PIEXRI.

### Информация об авторах / Information about the authors

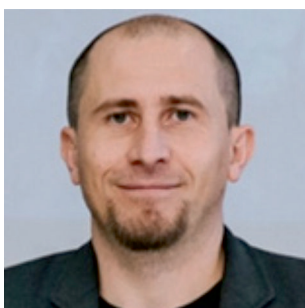


#### **Гантимурова Светлана Анатольевна,**

младший научный сотрудник департамента геоинформатики,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
[lanagant@geo.istu.edu](mailto:lanagant@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>

#### **Svetlana A. Gantimurova,**

Junior Researcher of the Geoinformatics Department,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
[lanagant@geo.istu.edu](mailto:lanagant@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>



#### **Паршин Александр Вадимович,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
проректор по геологии, наукам о Земле и окружающей среде,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования  
и геохимических методов поисков,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Российская Федерация,

✉ [sarhin@geo.istu.edu](mailto:sarhin@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

#### **Alexander V. Parshin,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Vice-Rector for Geology, Earth and Environmental Sciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation  
and Geochemical Prospecting Methods,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russian Federation,

✉ [sarhin@geo.istu.edu](mailto:sarhin@geo.istu.edu)  
<https://orcid.org/0000-0003-3733-2140>

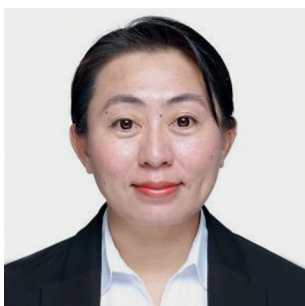


**Хуан Гуаньвэнь,**

профессор в области геодезии и мониторинга стихийных бедствий,  
Школа инженерной геологии и геоматики,  
Чанъаньский университет,  
г. Сиань, Китай,  
guanwen@chd.edu.cn  
<https://orcid.org/0000-0001-5584-5885>

**Guanwen Huang,**

Professor in Geodesy and Disaster Monitoring,  
School of Geological Engineering and Geomatics,  
Chang'an University,  
Xi'an, China,  
guanwen@chd.edu.cn  
<https://orcid.org/0000-0001-5584-5885>



**Ли Цзюньюань,**

доктор наук в области гидрогеологии,  
Школа водных ресурсов и окружающей среды,  
Чанъаньский университет,  
г. Сиань, Китай,  
ljy@@chd.edu.cn  
<https://orcid.org/0009-0001-1531-2192>

**Junyuan Li,**

PhD (Hydrogeology),  
School of Water and Environment,  
Chang'an University,  
Xi'an, China,  
ljy@@chd.edu.cn  
<https://orcid.org/0009-0001-1531-2192>



**Цзин Це,**

доктор наук в области геодезии и мониторинга стихийных бедствий,  
Школа инженерной геологии и геоматики,  
Чанъаньский университет,  
г. Сиань, Китай,  
jingce@chd.edu.cn  
<https://orcid.org/0000-0002-1796-1962>

**Ce Jing,**

PhD (Geodesy and Disaster Monitoring),  
School of Geological Engineering and Geomatics,  
Chang'an University,  
Xi'an, China,  
jingce@chd.edu.cn  
<https://orcid.org/0000-0002-1796-1962>



**Залуцкий Вячеслав Трофимович,**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией цифровой геодезии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
zalutskyvt@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-7318-2429>

**Vyacheslav T. Zalutskii,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Head of the Laboratory of Digital Geodesy,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
zalutskyvt@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-7318-2429>



### Вклад авторов / Contribution of the authors

С.А. Гантимурова – проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи.  
А.В. Паршин – разработка концепции, разработка методологии, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.  
Г. Хуан – разработка методологии, проведение исследования, написание черновика рукописи.  
Ц. Ли – проведение исследования, написание черновика рукописи.  
Ц. Цзин – проведение исследования, написание черновика рукописи.  
В.Т. Залуцкий – курирование данных, валидация результатов.  
Svetlana A. Gantimurova – investigation, visualization, writing – original draft.  
Alexander V. Parshin – conceptualization, methodology, writing – original draft, writing – editing.  
Guanwen Huang – methodology, investigation, writing – original draft.  
Junyuan Li – investigation, writing – original draft.  
Ce Jing – investigation, writing – original draft.  
Vyacheslav T. Zalutskii – data curation, validation.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

А.В. Паршин является членом редакционной коллегии журнала «Науки о Земле и недропользование» с 2023 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Alexander V. Parshin has been a member of the editorial board of the Earth Sciences and Subsoil Use journal since 2023, but he did not take part in making decision about publishing the article under consideration. The article was peer reviewed following the journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 25.02.2026.

The article was submitted 04.02.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 25.02.2026.



## Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Статьи принимаются на русском или английском языке. Журнал является полностью переводным, все статьи публикуются также на русском и английском языках. Редакция осуществляет перевод с русского на английский или наоборот самостоятельно, но авторы могут предоставить свой вариант перевода.

2. Статья сопровождается:

– электронными версиями всех документов (скан), в том числе:

авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;  
авторского договора;

сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов, ORCID каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию;

акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;

– цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG/JPEG;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

*Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!*

3. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows через online-форму <https://www.nznj.ru/jour/author/submit> или по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu). Шрифт – Arial, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

4. В журнал принимаются статьи трех типов:

**Научная статья.** Научная статья представляет собой оригинальную исследовательскую рукопись. Такого рода работа должна сообщать о результатах проведения научно обоснованных экспериментов и содержать значительный объем новой информации. Подготовка оригинальной статьи подразумевает использование самых свежих и актуальных источников в данной области. Структура подобной работы включает разделы «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем научной статьи – 3500 слов. Рекомендуемый объем списка литературы – от 20 источников.

**Обзорная статья.** Обзорная статья предполагает проведение всестороннего анализа существующей литературы в области исследования, который выявляет текущие пробелы или проблемы. Такая работа должна быть критической и конструктивной и содержать рекомендации для будущих исследований. В ней не следует представлять никаких новых неопубликованных данных. Структура обзорной статьи может включать введение, другие необходимые разделы, обсуждение полученных результатов, а также заключение с указанием будущих направлений для возможных исследований. Рекомендуемый минимальный объем обзорной статьи – 4000 слов. Рекомендуемый объем списка литературы – от 30 источников.

**Краткое сообщение.** Краткое сообщение представляет собой краткую статью, посвященную новому объекту, технологии, методу. Оно также может содержать предварительные результаты исследования либо краткое изложение полного исследования. В кратком сообщении должны быть описаны важные модификации или уникальные применения описанного метода. Краткие сообщения обычно содержат два-три рисунка и/или таблицу; раздел «Материалы и методы исследования» в них должен быть детализирован, чтобы обеспечить воспроизводимость представленной работы, а обзорная часть сокращена. Структура подобной работы аналогична структуре научной статьи и включает такие разделы, как «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты



исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем краткого сообщения – 2500 слов. Допускается последующая публикация расширенного материала, изложенного в кратком сообщении, в нашем либо ином издании с обязательной ссылкой на первую статью.

5. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

6. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

7. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и/или рисунки, приведенные в основном тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

8. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение».

9. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

10. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. *В случае, если на рисунке имеются надписи, должны быть предоставлены и русскоязычный, и англоязычный вариант иллюстрации.* Если на рисунке имеются условные обозначения, они должны быть пронумерованы, а их расшифровку стоит выносить в экспликацию к рисунку. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте рукописи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляется в формате TIFF или PNG/JPEG (сохранение необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

11. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.



Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20 для научной и не менее 30 для обзорной статьи, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала рекомендуется свести до минимума.

В списке литературы допускаются ссылки на источники на русском и английском языках: на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперiodических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в ядро РИНЦ (Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т.д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

12. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (Список источников) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5.2008. Второй вариант (References) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов.

13. Для каждого из соавторов в конце статьи прописывается индивидуальный вклад, который выбирается из следующего списка: разработка концепции; разработка методологии; курирование данных; формальный анализ; получение финансирования; проведение исследования; административное руководство исследовательским проектом; предоставление ресурсов; разработка программного обеспечения; научное руководство; валидация результатов; визуализация; написание черновика рукописи; редактирование рукописи.

14. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, финансирование, названия таблиц и подписанные подписи, references.

15. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

16. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

17. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

18. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

19. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

**Внимание! Публикация статей является бесплатной.**

*Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов и читателей.*

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через online-форму в личном кабинете на сайте [www.nznj.ru](http://www.nznj.ru) или по e-mail [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu); тел.: +7 (952) 6214436.

По дополнительным вопросам о публикации можно обращаться по адресу: 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет):

главный редактор Александр Вадимович Паршин, тел.: +7 (902) 7666990, e-mail: [sarhin@geo.istu.edu](mailto:sarhin@geo.istu.edu);  
заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, e-mail: [lauzina@mail.ru](mailto:lauzina@mail.ru).



Образец оформления статьи

УДК 549.09

## Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Е.М. Курчевская<sup>а</sup>, М.В. Яхно<sup>б</sup>, А.Е. Сенченко<sup>с</sup><sup>а</sup>НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», Иркутск, Российская Федерация<sup>б</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

**Резюме.** Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

**Ключевые слова:** Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

**Финансирование:**

**Благодарности:**

## Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya<sup>а</sup>, Marina V. Yakhno<sup>б</sup>, Arkady Y. Senchenko<sup>с</sup><sup>а</sup>NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russian Federation<sup>б</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract. Purpose.** The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition.



Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

**Keywords:** Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

**Funding:**

**Acknowledgements:**

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

#### Информация об авторах / Information about the authors

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Курчевская Елена Михайловна,**  
старший научный сотрудник,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru  
ORCID

**Elena M. Kurchevskaya,**  
Senior Researcher,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russian Federation,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru  
ORCID

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Яхно Марина Владиславовна,**  
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
✉ ymar@istu.edu  
ORCID

**Marina V. Yakhno,**  
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation,  
✉ ymar@istu.edu  
ORCID

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Сенченко Аркадий Евгеньевич,**  
генеральный директор,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Российская Федерация,  
senchenko@tomsgroup.ru  
ORCID

**Arkady E. Senchenko,**  
CEO,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russian Federation,  
senchenko@tomsgroup.ru  
ORCID

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

**Том 49 № 1 (94) 2026**

Дизайнер А.А. Хохряков  
Редактор Я.В. Макшанцева  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.03.2026 г. Формат 60×90/8.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15.  
Тираж 500 экз. Зак. 29. Поз. плана 4н

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции, учредителя и издателя:  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

